

Sol, lunas y planetas

Erhard Keppler

Biblioteca
Científica
Salvat

Sol, lunas y planetas

Erhard Keppler

SALVAT

Versión española de la nueva edición alemana de la obra *Sonne, Monde und Planeten*, publicada por R. Piper & Co. Verlag de Munich

Traducción: DIORKI Traductores
Artur Klein (para la nueva edición)
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass

Escaneado: thedoctorwho1967.blogspot.com
Edición digital: Sargont (2018)

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8909-5 (Volumen 29)
Depósito Legal: B-1552-1994
Publicada por Salvat Editores, S.A., Barcelona
Impresa por Printer, i.g.s.a.. Enero 1994
Printed in Spain

ÍNDICE

I. PREFACIO

La astronomía o la astrofísica son temas relativamente populares que han sido estudiados a menudo en libros fácilmente inteligibles. Sin embargo, durante mucho tiempo los planetas han estado en cierto modo marginados porque desde el punto de vista astronómico no existía nada nuevo que contar. La realidad es que la física de los planetas sólo se ha desarrollado en los últimos veinte años y que, por tanto, apenas existe bibliografía para recomendar a quien desee obtener una visión general sobre el estado actual de nuestros conocimientos acerca de los planetas, del espacio más próximo que nos rodea y de nuestro entorno más lejano. Éste es el motivo que me ha llevado a escribir este libro.

Pero no sólo falta una bibliografía fácilmente inteligible sobre la materia. Carecemos también de una monografía que sirva de manual. Por ello he ido un poco más allá en la confección del libro y me he ocupado de algunos aspectos más detalladamente de lo que cabría esperar. Las tablas 3-2 y 8-1. por ejemplo, recogen todas las cifras que conocemos en la actualidad sobre las lunas y los planetas; estos datos corresponden a los conocimientos existentes a finales de 1989.

También he pretendido, especialmente en la descripción de nuestro planeta, mostrar relaciones, explicar causas, llamar la atención sobre la sensibilidad de los procesos, dejar ver que los conocimientos sobre otros planetas nos ayudan a conocer mejor la Tierra. Todo ello resulta válido al hablar tanto de la física de los planetas como al referirse a la del Sistema Solar. Para comprender los múltiples peligros que acechan a nuestro medio ambiente hay que conocer la física de ese medio ambiente. Por desgracia, los jóvenes salen de nuestras escuelas con unos rudimentarios conocimientos de matemáticas, y con nociones casi nulas de física. No es de extrañar, pues, que los debates sobre el medio ambiente, y en especial los relacionados con la

utilización de la energía nuclear, tengan casi siempre un carácter predominantemente emocional y sólo en contadas ocasiones alcancen una dimensión técnica.

Este libro sobre nuestro mundo está escrito en el lenguaje de las ciencias naturales. He preferido mantener un lenguaje fácilmente inteligible, por lo que he prescindido de las fórmulas matemáticas. Mi intención es que el libro sea comprensible para cualquier tipo de lector; por otra parte, se pueden pasar por alto algunos puntos, ya que apenas se hace referencia a capítulos anteriores. Por todo ello confío en que esta obra sea tanto un libro de lectura como de consulta. También pretende hacer reflexionar, en la medida en que se ocupa de la historia de los planetas, de sus orígenes... y de su final. Refleja el nivel de nuestros conocimientos.

Me gustaría mostrar mi agradecimiento a todos aquellos que me han ayudado a escribir este libro. Especial reconocimiento merecen la doctora R. Lüst, los profesores Kippenhahn y Pfotzer y el doctor Musmann por la revisión crítica del manuscrito y por sus numerosas correcciones y comentarios. I. Schrader se ha hecho cargo del manuscrito y de las correcciones correspondientes; a ella y a todos los colaboradores de la editorial Piper, mi más profundo agradecimiento por sus consejos y ayuda.

ERHARD KEPPLER

II. HOMBRE Y OPINIONES

EVOLUCIÓN DE NUESTROS CONOCIMIENTOS SOBRE EL SISTEMA PLANETARIO

2.1. LOS PRIMEROS TIEMPOS

Durante el neolítico se desarrollaron culturas de gran relieve en diversos lugares de la Tierra en los que reinaban unas condiciones climáticas favorables, el suelo era fértil y había agua, como en los ríos Éufrates, Tigris, Nilo, Indo, Hoang-ho y en América Central. La desecación de amplias zonas y la formación de un cinturón desértico obligaron al hombre a convivir en los fértiles oasis que constituían los ríos; la proximidad espacial determinó la adaptación social. A consecuencia de ello se desarrolló la técnica como medio de ayuda en el trabajo; surgieron ideas (religión) y formas de expresión comunes (lengua, arte). Pronto se alcanzó una superproducción de alimentos, de modo que algunos miembros de aquellos grupos sociales pudieron dedicarse a actividades que no estaban destinadas a la producción de tales alimentos: la sociedad se diferenció.

Ya en esta primera fase de la evolución de la cultura humana surgió un interés por el Sol, la Luna y las estrellas: por un lado vieron la luz las primeras ideas —generalmente especulativas— acerca del «mundo»; por otro, se desarrolló una descripción exacta basada en la observación, que tomó la forma de la matemática y la astronomía. Los conocimientos geométricos empezaron a transmitirse a partir del año 5000 a.C., y curiosamente lo hicieron en casi todas las culturas a la vez (de la americana es bien poco lo que sabemos). El supuesto carácter supraterrenal llevó desde un principio a la astronomía al ámbito de lo religioso y la dejó, con ello, bajo el control de los sacerdotes.

Por aquella época aparecieron en Mesopotamia los sumerios, sobre cuyo origen no tenemos más datos; un poco más tarde también encontramos sus huellas en Egipto. Bajo su influencia, la cultura de aquellas zonas adquirió un rápido y variado desarrollo. Una importante condición para este florecimiento cultural fue la invención de la escritura, que debe situarse en tomo al año 3000 a.C. En seguida se extendió a las gentes del Indo y a Egipto.

Igual importancia revistió la extraordinaria invención de un sistema de numeración que recuerda a nuestro sistema decimal. Mientras que el sistema decimal, tal como apuntó Aristóteles, se halla en relación con los 10 dedos de nuestras manos, los babilonios —como se denominó más tarde al producto de la mezcla de los sumerios y de los otros pueblos— apreciaron las ventajas de un número base divisible entre muchos números sin resto y utilizaron el 12, y más tarde el 60, como número base (el 60 es divisible entre diez números sin resto, mientras que el 10 sólo es divisible entre dos de ellos). Los babilonios trabajaron con este sistema numérico, y la matemática y la astronomía conocieron un gran auge. Establecieron la duración del año (los egipcios conocían ya el concepto de «año» en el 4000 a.C.), que todavía no se había fijado con exactitud, en 360 días, agrupados en 12 meses de 30 días, de acuerdo con los 360 grados del círculo. El número 60 se introdujo, así, tanto en la medición de los ángulos como en la del tiempo, y se ha mantenido hasta nuestros días. Dado que los fenómenos naturales no coincidían con el calendario, más tarde se añadieron 5 días y se alargó el año a 365 días.

Los egipcios, que fijaban el comienzo del año en la aparición de la estrella Sirio, en la constelación del Perro Mayor porque al principio coincidía con el desbordamiento anual del Nilo, apreciaron a lo largo de su historia que, a pesar del año de 365 días, los fenómenos naturales y el calendario seguían sin coincidir. Por ello, unos dos siglos antes de nuestra era y después de más de un milenio de observación (!), añadieron cada cuatro años un día más, con lo que fijaron la duración del

año en 365,25 días. Esta práctica se ha mantenido porque César, en su reforma del calendario, se dejó aconsejar por un astrónomo egipcio.

Alrededor del año 2000 a.C. hicieron su aparición en la historia los griegos, cuyo origen, del que, al igual que en el caso de los sumerios, no existen huellas, fue probablemente indogermano. Hacia el 1440 a.C. habían conquistado Creta y la extinción del Imperio hitita alrededor del año 1200 a.C. les permitió colonizar la costa occidental del Asia Menor.

Lo que les diferenciaba de los babilonios y los egipcios era su distinta actitud ante los hechos de la naturaleza y ante los conocimientos adquiridos. Aunque entre los primeros los sacerdotes recogían informaciones (y las evaluaban con ciertas limitaciones), en esencia describían de un modo contemplativo los fenómenos del mundo (lo que en el extremo oriente ha predominado hasta los tiempos modernos en la filosofía y la ciencia); los griegos, en cambio, comenzaron a interesarse por *cómo* podían entenderse las observaciones realizadas. Eran un pueblo distinto, más libre, más imparcial que sus vecinos; con los griegos comenzó lo que hoy entendemos por «actuación científica». En la actualidad solemos relacionar el surgimiento de esta nueva actitud con la figura de Tales de Mileto, que nació alrededor del 640 a.C. y vivió 78 años.

Mileto se convirtió en seguida en una próspera ciudad comercial (se estima que en aquellos tiempos vivían en Grecia tres millones de personas) que mantenía relación con los lugares más importantes de Oriente. No es extraño que, con los bienes comerciales, llegaran también los bienes culturales de otros pueblos. Los griegos adoptaron la escritura fenicia (que en un principio constaba sólo de 22 letras) hacia el año 1100 a.C., transformando en vocales algunas consonantes superfluas. De este modo surgió la primera escritura fonética (a partir del alfabeto griego se desarrollaría más tarde el latino). Pero los griegos adoptaron también el sistema decimal: en este hecho hay que ver el motivo más importante del desarrollo de nuestra cultura occidental. Los jonios tuvieron acceso a los papiros egipcios hacia el año 600 a.C., con lo que les fue posible desarrollar una escritura. Sin embargo, no nos ha llegado ningún texto de

los primeros filósofos jonios. Aristóteles fue, sin duda, el primer escritor que ocasionalmente hizo referencia a los trabajos de filósofos anteriores.

En esta próspera ciudad de la costa occidental del Asia Menor, Mileto, comenzaron a destacar por primera vez en la historia personalidades individuales. Tales, una de esas personalidades, tomó el camino de las especulaciones —naturalmente— cosmológicas. El agua del océano es «el principio y origen de todas las cosas». Introdujo el concepto de los «primeros principios», sobre los que se podía basar el pensamiento. Los primeros principios no se pueden explicar: son evidentes por sí mismos. En sus viajes a Egipto, el pensador de Mileto tuvo probablemente acceso a los conocimientos astronómicos de los egipcios. Esto y sus posteriores aportaciones a la geometría le convirtieron en una destacada figura de los primeros momentos del pensamiento griego. Según narra Herodoto, predijo con toda exactitud el eclipse de Sol del año 585 a.C. ¿Cómo fue posible?

De las descripciones que Homero; hace de los primeros tiempos de Grecia (1000 a.C. aproximadamente) se desprende la idea de que la Tierra es un plato liso que flota en el «okeanos». Pitágoras (nacido en el 580 a.C.) sabía ya que la Tierra era una esfera; Tales debía saberlo también, pues de lo contrario no habría podido predecir el eclipse de Sol. Probablemente llegara por sí mismo a tal conclusión.

Leucipo (450 a.C.) consideró que el Sol y la Luna eran cuerpos sólidos y qué la luz de la Vía Láctea estaba constituida en realidad por la luz de muchas estrellas lejanas. Hacia el año 350 a.C. Heráclito explicó correctamente la alternancia día-noche por la rotación de la Tierra en torno a su eje en 24 horas. Consideró a los planetas como cuerpos similares a la Tierra, pero dio un carácter infinito al cosmos. Así, a la descripción astronómica de egipcios y babilonios se añadió en el pensamiento griego la especulación cosmológica que, aunque surgida de los mitos, consiguió liberarse de las limitaciones mitológicas y adquirió un carácter original. Los griegos no ofrecieron ninguna interpretación del origen del mundo, pero sí lo hicieron los egipcios, que pensaban que había habido un tiempo

en el que no existían el cielo y la tierra, sino sólo el agua original infinita, el Nû. Esta idea, que quizá fuera de origen babilonio pasó al Antiguo Testamento.

El florecimiento de las ciencias en Mileto finalizó con el comienzo de la dominación persa. Los filósofos jonios emigraron a Italia y tras la expulsión de los persas (guerras médicas, 500-479 a.C.) el impulso científico se centró en Atenas en los filósofos Socrates, Platón y Aristóteles (384-322 a.C.). Posteriormente se produjo la fundación de Alejandría (332 a.C.) por Alejandro Magno (356-323 a.C.) y el increíble apogeo de esta ciudad en tiempos de los Tolomeos.

2.2. LA ÉPOCA DE TRANSICIÓN

La gran tradición astronómica de los griegos se cierra con Aristarco de Sarnosa (310-230 a.C.) considerado el último gran astrónomo de Grecia. Según Arquímedes entendió el mundo como un sistema heliocéntrico. Tras él surge en Alejandría una nueva tradición astronómica en la que, destacan tres grandes nombres muy distanciados en el tiempo: Apolonio (230 a.C.), Hiparco (130 a.C.) y Claudio Tolomeo) (85-160 a.C.). Hiparco construyo un observatorio en Rodas, donde realizó mediciones de la posición de los astros, elaboró un catálogo de casi 800 estrellas y fijó la precesión de los equinoccios de la Tierra en 45" por año (hoy lo fijamos en 50,2"). Se le considera el fundador de la trigonometría. Fue el primero que intentó clasificar las estrellas por su luminosidad al dividirlas en seis «categorías de magnitud».

Alejandro Magno quiso hacer de Alejandría el centro espiritual de su Imperio. Por ello, sus sucesores, los Tolomeos, fundaron el «Museo», al que podemos considerar como la forma primitiva de nuestra actual universidad. A ello hay que sumar la constitución por Tolomeo II (283-246 a.C.) de la grandiosa biblioteca de Alejandría que desde un principio tuvo unas dimensiones desproporcionadas para aquellos tiempos.

Se convirtió en el modelo de la posterior biblioteca de Pérgamo, en Misia. La gran biblioteca contaba con 700.000 volúmenes de literatura, matemáticas, astronomía y medicina. Fue destruida por un incendio en el año 47 a.C. Dado que los conocimientos astronómicos de los griegos no eran lo suficientemente precisos como para explicar las desviaciones del calendario, se intentó mejorar la observación astronómica. De este modo surgió en Alejandría una respetable escuela y la astronomía se convirtió en una ciencia.

Tolomeo tenía a su disposición una extraordinaria base: todos los conocimientos del ámbito mediterráneo. Por ello gozó de la oportunidad de recoger en un libro, la *Μεγιστη ύνταξιζ (Svntaxis Mathematica),* el conocido *Almagesto,* los conocimientos de astronomía de su tiempo, no sin realizar ciertas aportaciones propias. Ésta no dejó de ser una circunstancia venturosa, pues los cristianos destruyeron en el año 391 d.C. los restos de la biblioteca, que por aquel entonces contaba con más de 40.000 volúmenes (probablemente lo hicieron por indicación del arzobispo Teófilo de Alejandría).

Tolomeo recoge en su libro las principales hipótesis de la astronomía de su época: la esfera celeste que gira en torno a su eje, la Tierra redonda en el centro de la esfera celeste. Describió como un problema geométrico el movimiento del Sol, la Luna y los planetas, a los que denominó «estrellas errantes» para diferenciarlos de las demás (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter, Saturno). Agregó más de mil estrellas al catálogo de Hiparco y desarrolló una explicación del movimiento de la Luna, recogiendo y perfeccionando la teoría del movimiento de los planetas: por primera vez relacionó su movimiento con el plano de la eclíptica. El denominado «sistema de Tolomeo» mantuvo su importancia durante milenio y medio. Las obras de Tolomeo se enseñaban en las escuelas; en el siglo IX se tradujo el Almagesto-al árabe *(Kitab Al-magisti)* de ahí se derivó el nombre *Almagesto,* en un claro ejemplo de abandono lingüístico) y en el XII se realizó la traducción del árabe al latín.

Como se observa, sólo se ha hecho una breve referencia a Aristóteles. Si bien es cierto que siempre se valora y destaca su

importancia y la de Platón para la filosofía de Occidente, a menudo se olvida que durante milenio v media-este auge de la filosofía griega constituyó un obstáculo para el desarrollo de las ciencias. Platón, que no era matemático, tenía una buena opinión de esta ciencia. La fachada de la Academia estaba adornada por la frase: «No entrará quien no sea matemático». Pero Platón se refería a la matemática «pura»; dudaba de su aplicación a la «physis», a la naturaleza del entorno. Aristóteles, en cambio, trató un número singularmente notable de cuestiones físicas, intentando aplicar siempre el método deductivo. Como muchos de los supuestos de los que partía eran falsos, llegó también a conclusiones erróneas que, sin embargo, fueron consideradas como intocables en Europa durante casi un milenio. El «aristotelismo» constituyó para la. Iglesia una coartada perfecta: el hombre como coronación de la creación podía deducirle su pensamiento cómo era el mundo. (El dogmatismo de la Iglesia tiene sus raíces en este hecho.) Sólo Copérnico, Kepler, Galileo y Newton abrieron el camino de las ciencias naturales modernas.

2.3. LA ÉPOCA DE LA OSCURIDAD

Curiosamente, el Islam no asumió nunca las ideas aristotélicas que durante tanto tiempo influyeron en el pensamiento cristiano. El cristianismo siguió a Aristóteles y condenó las ciencias exactas; en cambio, en el mundo musulmán se conservó la tradición científica El Islam no combatió ninguna idea sobre el mundo. De este modo, en la cultura islámica se mantuvo vivo el espíritu de los griegos. Con la llegada de los árabes a España se extendieron a Italia y Europa central los conocimientos de los griegos y de las matemáticas y la astronomía alejandrinas; en Europa el griego había caído en el olvido y en el Imperio romano, que dominó el espacio mediterráneo tras Alejandro Magno, se había introducido un sistema de numeración que hacía casi imposible el cálculo matemático. Por eso no conocemos a ningún matemático ni a ningún naturalista ro-

mano de relieve. Los etruscos, que habían transmitido la cultura griega a los latinos (dioses, mitos), extendieron la escritura fonética de los griegos a los pueblos de Europa. Hacia el año 400 a.C. el avance celta dispersó a los etruscos, que se mantuvieron en algunos valles de los Alpes como portadores de la cultura rética.

La «noche» cayó sobre Europa (como se dice a menudo de modo exagerado) cuando en el año 642 d.C. se destruyeron los restos de la biblioteca de Alejandría. En aquel momento la geometría parecía tener una base axiomática debido, ante todo, a Euclides (de hecho era deducible en el sentido de Aristóteles). No existía todavía el álgebra y la física no había sido impulsada desde los tiempos de los griegos. Por otra parte, después de Aristarco la astronomía había entrado, con Hiparco, en el callejón sin salida del «sólo observar y describir»; se había perdido el interés por las ciencias naturales exactas. En el siglo V de nuestra era apareció de nuevo en la India un sistema de numeración similar al de los babilonios. Más tarde sería adoptado por los árabes y llegaría a Europa en la época de la escolástica a través de la conquista árabe de España.

En los comienzos de la era cristiana existían importantes matemáticos en el mundo islámico (al-Hazen. al-Kwarzimi, fundador del álgebra. Ibu-Ymas y al-Biruni) Por iniciativa del gran califa Harun al Raschid se tradujeron al árabe las obras de los científicos griegos. Esta época dejó también sus huellas en la astronomía, tal como lo demuestran los nombres de algunas estrellas (Aldebarán, Betelgeuse).

En el siglo XII se tradujeron sobre todo en España textos del árabe al latín: es el caso de los *Elementos* de Euclides, cuya versión se realizó en Córdoba, y del *Almagesto* de Tolomeo, traducido por Gerardo de Cremona (1114-1187). Posteriormente fueron principalmente los escolásticos quienes se encargaron de la difusión del pensamiento griego, y fundamentalmente de Aristóteles, en Europa.

Un hecho importante para el desarrollo de Occidente fue la propuesta del matemático italiano Leonardo de Pisa, quien recomendó la introducción del sistema de numeración árabe en lugar del romano.

Este sistema fue utilizado por primera vez por John de Holywood en un libro de texto de aritmética y astronomía. Por encargó del rey Alfonso X el Sabio, en el año 1252 unos judíos elaboraron en Toledo unas nuevas tablas astronómicas y procedieron a emplear este sistema (labias alfonsíes)) Al final del siglo XIII los signos árabes eran bastante conocidos y aceptados. Así pues, el Islam conservó los conocimientos de los griegos y los trasladó a Europa central; de este modo llegó hasta nosotros el práctico sistema de numeración que hoy usamos. Un camino largo y complejo, pero de gran importancia para la evolución de Occidente. El modo griego de preguntarse por las características de la naturaleza, la escritura griega, el sistema de numeración árabe, todo ello hizo posible la «cultura occidental», que se basa, ante todo, en las ciencias naturales. Aunque todos los pueblos han desarrollado la poesía, la filosofía, el arte, sólo Occidente aportó la tarea de crear las ciencias naturales, que modificaron el conocimiento sobre la Tierra e influyeron en nuestra vida de manera decisiva.

2.4. LA LIBERACIÓN: COPÉRNICO, KEPLER, GALILEO, NEWTON

Con la escolástica se despertó en Europa, y sobre todo en Alemania, el interés por la astronomía coadyuvado por la fundación de muchas universidades; entre tanto, Francia e Inglaterra sufrían todavía las consecuencias de la Guerra de los Cien Años. Nikolaus von Kues (1401-1464), Georg Peuerbach (1423-1461), Johannes Müller (Regiomontano) (1436-1476) y, por ultimo, Nicolás Copérnico, Michael Mästlin y Johannes Kepler fueron los hombres más importantes de aquella época e hicieron posible la liberación del pensamiento científico, con el nacimiento de las ciencias naturales modernas.

Pero la rápida evolución de las ciencias naturales resulta impensable sin un avance técnico que modificó radicalmente las condiciones necesarias para el cultivo de las ciencias: la invención de la imprenta por Gutenberg hacia 1450. El libro im-

preso, más fácil de conseguir, fue ocupando el lugar del trabajoso estudio de los pergaminos en monasterios y bibliotecas. De nuevo fue una simplificación técnica, que hacía más fácil el trabajo, la que marcó el comienzo de una nueva época en las ciencias naturales. Y este nuevo punto de partida también estuvo representado por una persona: Copérnico hizo su entrada en la escena histórica.

Niklas Koppernigk nació el 14 de febrero de 1473 en Torún. Estudió en la Universidad de Cracovia y, más tarde, en la de Bolonia. Allí aprendió el griego y leyó las obras de Platón. Mantuvo una estrecha relación con el astrónomo Domenico Maria da Novara, quien introdujo a Copernicus (como se escribió su nombre en forma latinizada) en la astronomía. De nuevo en su país natal, en 1497 fue nombrado canónigo de Frauenburg, y en ese mismo año marchó de nuevo a Padua, donde quería estudiar derecho y medicina. Tras nueve años de estancia en Italia, en 1506 regresó a Polonia, primero a Heilsberg como consejero de su tío, arzobispo de Ermland, pasando en 1512 a Frauenburg, donde vivió hasta su muerte en 1543. Copérnico apenas ha explicado cómo llegó al sistema heliocéntrico. En su obra *De Revolutionibus* describe la teoría del movimiento de los planetas vigente hasta entonces, sus dificultades, sus errores, y llega a la conclusión de que en ella se debía haber pasado por alto algo importante. Había leído un gran número de obras filosóficas. En las obras de Cicerón y Plutarco encontró referencias a filósofos que pensaban que la Tierra se movía. Fue entonces cuando comenzó a pensar que tales movimientos se podían aplicar también a los planetas. Del resto no dice nada más. Pero es de suponer que la notable simplificación matemática que consiguió le llevara por el camino adecuado. Sus antecesores griegos sólo le proporcionaron el impulso. Conocía las ideas de Aristarco, y es probable que antes de 1514 estuviera convencido de la necesidad de recurrir a un sistema heliocéntrico.

El historiador de Cracovia Mathias von Miechow incluyó en 1514 en un índice de sus libros la obra *Theorice asserentis terram moveri, solem vero quiescere*. (Sobre la teoría de los planetas de una Tierra en movimiento, pero un Sol quieto.) Es

probable que Copérnico escribiera el *Commentariolus* poco después de su regreso de Italia, esto es, después de 1507 (con el título completo de *Nicolai Copernici de hypothesibus motuum coelestium a se constituís commentariolus*). Más tarde redactaría su obra principal, *De Reuolutionibus Orbium Coelestium Libri Sex*, en la que trabajó durante unos treinta años. El *Commentariolus* debió escribirlo como un breve resumen cediendo a los ruegos de los amigos y dejando circular el manuscrito. Finalmente, éste cayó en manos del joven Georg Joachim Rheticus, de Wittenberg, quien publicó un resumen *(Narrado Prima)* que fue impreso en Danzig en 1540.

Como era de esperar, tuvo gran eco. Contento por ello, Copérnico accedió a la publicación de su obra, que apareció en 1543, editada por el teólogo Andreas Osiander, en Nuremberg; Copérnico recibió una copia de ella el mismo día de su muerte, el 24 de mayo de 1543.

El *Commentariolus* contiene de forma axiomática siete hipótesis («petitiones») que describen de un modo breve y claro el «sistema copernicano». A continuación citamos las cuatro primeras hipótesis según la traducción alemana de F. Rossmann.[1]

Primera hipótesis: no existe un único punto central de las esferas celestes.

Segunda hipótesis: el centro de la Tierra no es el centro del mundo, sino sólo el de la gravedad y el de la órbita de la Luna.

Tercera hipótesis: todas las órbitas rodean al Sol, como si éste estuviera en el centro de todas; por ello el centro del mundo se halla cerca del Sol.

Cuarta hipótesis: la proporción entre la distancia Sol-Tierra y la altura de la esfera celeste es menor que la existente entre el radio de la Tierra y la distancia al Sol, de modo que ésta es imperceptible frente a la altura del cielo.

---

[1] F. Rossmann: *Nikolaus Kopernikus-Erster Entwurf seines Weltsystems.* Ed. H. Rinn. Munich. 1948.

De este modo tan claro y sencillo describe su sistema. En *De Revolutionibus* están incorporadas las «hipótesis» en distintos capítulos, acompañadas de deducciones sacadas de las mismas. La obra contiene además la teoría astronómica con la que intenta explicar, entre otras cosas, las pequeñas desviaciones de las órbitas observadas. Aquí introduce hipótesis *ad hoc*, y «sólo» necesita 34 órbitas para ilustrar el funcionamiento del universo. Kepler se encargaría más tarde de perfeccionar la teoría astronómica.

La aportación de Copérnico queda expresada en sus tres primeras hipótesis: lo que más le molestaba era el hecho de que en el sistema de Tolomeo los movimientos de los planetas fueran irregulares. La perfección de un sistema tal como lo definían la filosofía y la teología exigía un movimiento uniforme. Para conseguirlo había que modificar un principio del sistema antiguo: lo hace en la primera hipótesis, en la que introduce una matización al hablar de esferas celestes. Su idea de que un número, el menor posible, de tales esferas debe reflejar las observaciones empresa un principio que aparece de nuevo en la física de los tiempos modernos y que con frecuencia se encontró en la base de la ampliación de la imagen del mundo: entre las posibles descripciones de un sistema la más sencilla es probablemente la más acertada.

En una segunda hipótesis Copérnico no dejó ya ninguna duda sobre la importancia de esta idea: renuncia al «centro del mundo»; por otra parte, en la tercera admite el movimiento de la Tierra. Desde el punto de vista físico, esto era lógico. Pero desde el punto de vista filosófico significó el comienzo de una nueva época, la liberación del dogma de lo establecido: el igual trato de todos los posibles sistemas con una valoración objetiva de su calidad.

El resto del siglo XVI fue un período de transición. *De Revolutionibus* ocupó el lugar del *Almagesto* y Erasmus Reinhold publicó la *Tabula Prutenicae*, con un conjunto de tablas basadas en el sistema de Copérnico, que sustituyeron a las «tablas alfonsíes» y que le serían de gran utilidad al primer gran astrónomo de la edad moderna, Tycho Brahe.

El francés Petrus Ramus se reunió hacia mediados de siglo con el danés Tycho Brahe (1546-1601) en Augsburgo, tal como se desprende de los apuntes del segundo. Ramus admiraba a Copérnico porque había rechazado todas las hipótesis antiguas y había introducido otras prácticamente nuevas. Opinaba que había que considerar como órbitas aquellas que mejor reflejaran un gran número de posiciones observadas en un planeta. Brahe no apreció el principio básico en las ideas de Ramus, pero se dio cuenta de que era preciso contar con una larga serie de observaciones y se mostró de acuerdo en que la astronomía debía estar basada en la observación. El astrónomo danés tomó este camino con gran talento y paciencia.

En 1597 Brahe abandonó Dinamarca y se estableció en Bohemia. Allí llegó en el año 1600 Johannes Kepler, que había sido expulsado de Graz a causa de sus ideas religiosas. Ambos se conocían por haber tenido con anterioridad contactos epistolares; el primer libro de Kepler se había publicado en 1596, después de haber sido introducido su autor en la astronomía por Mästlin.

Johannes Kepler nació el 27 de diciembre de 1571 en Weil der Stadt. En seguida dio a su nombre la forma latinizada de Keplerus. Cuando Brahe murió en 1601, le dejó a Kepler el gran tesoro de sus observaciones. Realizando trabajosos cálculos, Kepler satisfizo la exigencia de Ramus en el sentido de abordar las observaciones sin suposiciones previas. De este modo descubrió que los movimientos orbitales de los planetas, que durante dos milenios habían sido un enigma, se podían explicar fácilmente si se aceptaba que se trataba de órbitas elípticas, uno de cuyos focos estaba ocupado por el Sol; el radio vector barre áreas iguales en tiempos iguales (ley de las áreas) y, por otra parte, la proporción entre los cuadrados de los períodos de revolución y los cubos de las distancias medias es constante. No hay que ocultar un pequeño detalle: la ley de las áreas (correcta) la dedujo de dos teoremas falsos cuyos errores se compensaban.

Con ello, Kepler —a diferencia de todos sus antecesores— no formuló una hipótesis nueva con cuya ayuda se podía calcular la posición de los planetas; se limitó a definir la órbita

real de los planetas y cultivó por primera vez la física. El único argumento que Copérnico pudo presentar para su teoría del sistema heliocéntrico era que estaba en condiciones de sustituir de un modo sencillo el complicado sistema de esferas, epiciclos, etc. No podía demostrar la veracidad de su sistema. Los cálculos de Kepler describían por primera vez las órbitas reales. Lo que no podía explicar era por qué las órbitas son elipses y por qué giran los planetas alrededor del Sol. Su intento de introducir la idea de una fuerza magnética demuestra que desde el punto de vista físico estaba en el camino adecuado. Aunque Galileo tampoco pudo añadir nada, sus observaciones permitieron llegar a la verdad. En los últimos años de su vida, Kepler se interesó por el «magnetismo de los planetas» e intentó localizar el polo magnético de la Tierra mediante mediciones. Suponía que todos los planetas tenían un eje magnético: consideraba que la fuerza magnética era la que movía el sistema planetario, y en consecuencia no conocía todavía la gravitación. Buscaba una fuerza constante que pudiera mantener el movimiento de los planetas y estaba seguro de que no hacía falta nada más. No llegó a conocer que la gravitación era esa fuerza, a pesar de que relacionó las mareas con la existencia del Sol y la Luna. Cuando murió, el 15 de noviembre de 1630, dejó tras sí la descripción matemática del sistema de Copérnico, libre de hipótesis. Se habían sentado las bases de la física del Sistema Solar.

Los trabajos científicos de Kepler están enmarcados en una serie de especulaciones místicas. Por otro lado, resulta sorprendente lo claros que son sus argumentos cuando se trata de temas astronómicos. Pero cuando entra en el terreno de filosofía resulta difícil seguirle: estaba muy arraigado en la tradición medieval. Quizás enturbiara él mismo estas partes de sus escritos para defenderse; en la Austria católica fue perseguido como protestante y en realidad no se podía esperar menos de un autor como él. Kepler era por naturaleza un teórico matemático, encontrándose al final de una época que él mismo cerró con la correcta descripción cinemática del Sistema Solar. Albert Einstein (Aus *meinen späten Jahren*, DVA, Stuttgart, 1953) escribió lo siguiente sobre Kepler: «Estaba obligado a abandonar el

método de investigación animista, un modo de pensar que hacía referencia a los fines últimos. Tuvo que reconocer primero que ni siquiera la teoría matemática más lógica, más clara, ofrecía garantía alguna de la verdad, careciendo de importancia mientras no resistiera a las más exactas observaciones de las ciencias naturales. La obra de Kepler no habría sido posible sin esta orientación filosófica »

En contraposición a Kepler. Galileo Galilei, que vivió en la misma época, fue lo que denominaríamos un físico experimental. Y esto se puede ilustrar con una breve historia: el fabricante de lentes holandés Jan Lippershey había construido un telescopio. Cuando Galileo se enteró de la noticia, quiso hacerse con uno de aquellos aparatos, sin importarle cómo funcionaban. Kepler, en cambio, trabajó en la teoría óptica del telescopio y en 1604 publicó su obra *Astronomía pars optica*, a la que siguió en 1610, en la *Dioptrice*, una teoría de las lentes que hizo posible el posterior desarrollo sistemático de los telescopios. Nunca construyó un telescopio. Por el contrario, Galileo fabricó más tarde sus propios telescopios siguiendo las indicaciones de Kepler y con ellos encontró las cuatro grandes lunas de Júpiter, a las que denominó «lunas mediceas». Más tarde recibieron en su honor el nombre de Lunas de Galileo. Descubrió las fases de Venus, observó las manchas solares, calculó —cuando estuvo seguro de que las manchas estaban en el Sol y no en un punto del espacio situado entre la Tierra y el Sol— los períodos de rotación del Sol y verificó que las manchas sólo son oscuras en comparación con la zona de su alrededor, que su existencia es muy limitada en las proximidades del ecuador y que el eje de rotación del Sol no se halla exactamente vertical con respecto al plano de la órbita terrestre. Observó la superficie de la Luna, descubrió valles y montañas y calculó la altura de éstas. Por último, interpretó las «nubecitas y agrupaciones nebulosas» de la Vía Láctea como aglomeraciones de estrellas.

Galileo apenas se ocupó de la teoría de los planetas. Ni siquiera aceptó la órbita elíptica; consideró a los cometas —Tycho Brahe y Kepler habían demostrado que no tenían un origen terrestre— como vapores de la Tierra que reflejaban la luz.

Galileo fue muy contradictorio también en otros muchos aspectos. Si por un lado no conocía la teoría de los planetas, por el otro podía describir las alteraciones mutuas de sus órbitas (en *Dialogo sopra i due massimi sistemi del Mondo, Tolemaico e Copemicaus).*

Galileo Galilei nació el 15 de febrero de 1564 en Pisa y falleció el 8 de enero de 1642 en Florencia. Su gran aportación fueron sus estudios sobre los movimientos de caída y de lanzamiento, con lo que introdujo la cinemática en la física. Percibió la relatividad del movimiento uniforme, y en sus experimentos sobre la caída observó que cuerpos de distinto peso caen a igual velocidad en el campo de gravitación —prescindiendo de la resistencia al aire—. De la observación del péndulo pasó a la afirmación de que el efecto de una fuerza sobre un cuerpo hay que buscarlo en la modificación de su estado dinámico. A él se le atribuye la iniciación del método científico: su tarea consiste en formular hipótesis generales que explican determinados fenómenos y que, una vez verificadas, permiten descubrir las leyes de la naturaleza. Con ello estaba en clara contradicción con el «aristotelismo» deductivo, aceptado por la Iglesia. Aristóteles había dicho que los cuerpos pesados caían más deprisa que los más ligeros y que bajo el efecto constante de una fuerza un cuerpo se movía con arreglo a una velocidad constante. En el ejemplo de la trayectoria de un cuerpo Galileo demostró la importancia de la definición matemática, con cuya ayuda pudo hacer predicciones sobre el transcurso de los procesos. Sus observaciones apoyaban el sistema de Copérnico, y la Iglesia reconoció que no se trataba de una opinión minoritaria. Los filósofos escolásticos de Pisa combatieron sus ideas porque se oponían a la autoridad de Aristóteles, al «aristotelismo» deductivo característico del dogma eclesial.

En 1615/16 se celebró el primer proceso de la Inquisición contra él, en el que Galileo fue obligado a guardar silencio. En 1632 volvió a defender sus ideas en una obra sobre los sistemas tolomeico y copernicano, siendo sometido el año siguiente a un segundo proceso, durante el cual fue obligado a abjurar bajo amenaza de tortura. A partir de entonces permaneció bajo vigilancia de la Inquisición, quedó ciego en 1637 y murió cinco

años después. Sus obras no fueron borradas del índice hasta 1835 (!).

El hecho de que la Iglesia católica preparara en 1981 una «reanudación» del proceso contra Galileo —como una rehabilitación tardía, por así decirlo— produce una extraña impresión en un mundo marcado por la ciencia. Las cuestiones por las que se sometió a Galileo al proceso quedaron resueltas hace mucho, y el pensador italiano ocupa desde hace tiempo su lugar como una de las grandes personalidades de la historia de la humanidad.

Los teólogos, católicos y luteranos, no aceptaron las ideas de Copérnico. Por ello, el teólogo Osiander —el editor— añadió anónimamente a *De Revolutionibus* un prólogo en el que rebajaba las ideas expuestas a la calidad de hipótesis. Giordano Bruno había sido quemado vivo en el 1600, como hereje, a causa de sus ideas y de su reconocimiento del sistema copernicano. En tales circunstancias, ¿qué consecuencias iba a tener el descubrimiento de las lunas de Júpiter por Galileo? Con él se hizo evidente por primera vez que la idea de que la Tierra ocupaba una posición especial era insostenible: no se trataba sino de un planeta más entre otros muchos. El descubrimiento de las manchas solares y de su variabilidad, realizado por Galileo poco después, tuvo consecuencias similares: se había rebatido el dogma aristotélico de la invariabilidad de los cuerpos celestes. En 1616 la Inquisición romana declaró herejía a la «doctrina» del movimiento de la Tierra. Había que «limpiar» el libro de Copérnico; el *Diálogo* de Galileo se incluyó en el índice junto con el *Epítome* de Kepler. Por fortuna, las ideas de Copérnico no fueron perseguidas en los países protestantes y de ahí que la resistencia de la Iglesia no lograra impedir que acabaran imponiéndose.

Por último, Isaac Newton demostró que la segunda ley de Kepler era una consecuencia de la gravitación. Si los filósofos anteriores habían mezclado siempre las observaciones con ideas filosóficas y habían impuesto una serie de extrañas limitaciones a la astronomía, Kepler, siguiendo las recomendaciones de Ramus, libre de prejuicios y basándose en los extraordinarios trabajos de Tycho Brahe, reconoció la importancia de

las observaciones y confirió al sistema de Copérnico una existencia propia al margen de la filosofía. Newton puso fin a todas las controversias al demostrar que el sistema descrito por Copérnico y Kepler no sólo coincidía con la realidad, sino que además era el único posible.

Isaac Newton nació el 4 de enero de 1643, el mismo año en que murió Galileo, en Woolsthorpe. Resolvió el problema de qué fuerza (*F*) mueve a un planeta (m_1) a una distancia *r* alrededor del Sol (m_2) y demostró que la constante *K* de su ley de gravitación

$$F = K\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

tiene un carácter universal, esto es, que la ley describe tanto la caída de un cuerpo sobre la Tierra como el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra o el de la Tierra alrededor del Sol. Con ello quedaba claro que un cuerpo tenía que moverse alrededor del Sol en una órbita elíptica (el círculo es una elipse especial) o, con muy elevada velocidad, en una hipérbola, de ahí se deriva el teorema de las áreas (la segunda ley de Kepler). También demostró que la tercera ley de Kepler, según la cual los cuadrados de los tiempos de recorrido de los planetas se comportan como las terceras potencias de su distancia media, sólo era relativamente válida. A partir de la analogía de la caída libre sobre la Tierra con el movimiento de los planetas, Newton llegó a la conclusión de que la dirección de la fuerza tenía que ser radial, no tangencial, como había especulado Kepler. Demostró, por último, que, dado que nuestro planeta es una esfera achatada por los polos, la gravitación del Sol y la Luna influye sobre la Tierra en rotación y ejerce sobre ella un momento de giro que determina un movimiento de precesión en el eje, cuyo período casi calculó correctamente.

Según su propio testimonio, en 1665/66 descubrió la ley de la gravitación, de la que pudo derivar sin problemas las leyes de Kepler. La publicó, a instancias de sus amigos, en su libro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* —de forma abreviada, *Principia*—, que no apareció hasta 1687.

Con la formulación de la ley de la gravitación quedaba resuelto el problema astronómico de la exploración del Sistema Solar. Con anterioridad ya se habían hecho numerosas referencias a la gravitación: Plutarco escribió que el movimiento impedía que la Luna se cayera, del mismo modo que no se caen los objetos que giran en el aire atados a una cuerda. Kepler consideró que dos piedras se atraerían en el espacio. Robert Hooke (1635-1703) postuló que si la fuerza de atracción F fuera $F = 1/r^2$, los planetas se moverían en órbitas elípticas. Christian Huygens explicó la fuerza centrífuga y René Descartes la ley de la aceleración que Galileo demostró pero no reconoció como principio. Newton recogió todas estas ideas y formuló la ley de la gravitación.

2.5. LA ÉPOCA MODERNA: DESPUÉS DE NEWTON

Con la conquista de Bizancio por los turcos en el año 1453 se inició una nueva etapa. En los años siguientes se difundió por Europa el vasto tesoro de las bibliotecas bizantinas y por fin se pudieron conocer las obras originales de los griegos que los escolásticos habían traducido del árabe al latín (así. p. ej., en 1475 vio la luz la *Geografía* y en 1515 el *Almagesto* de Tolomeo). Europa comenzó a inclinarse hacia el helenismo, especialmente en el terreno de las ciencias «no naturales», que tenían un carácter marcadamente individual, partían de imaginaciones y se aferraban a ellas. Sin embargo, el redescubrimiento del saber griego —el modo griego de plantearse problemas— ayudó a las ciencias naturales a liberarse de las limitaciones impuestas por el dogma cristiano. Bien es verdad que, dado que las ciencias naturales son acumulativas, en seguida superaron los principios y los métodos de los griegos. Si a la era de Copérnico, Kepler y Galileo se la puede considerar todavía como la de la «liberación de las ciencias naturales», con Isaac Newton comenzó la física moderna.

Después de Newton se abrió un largo período en el que la astronomía del Sistema Solar apenas se desarrolló; fueron

como las últimas pinceladas de un cuadro casi terminado. Mediante la triangulación, en 1672 los astrónomos Giovanni Domenico Cassini y Jean Richter midieron por primera vez de un modo absoluto y exacto la distancia de Marte; en 1676 Olaf Römer calculó por vez primera la velocidad de la luz observando las lunas de Júpiter y la diferencia de tiempo que se daba cuando la Tierra se encontraba en su órbita entre el Sol y Júpiter y cuando se encontraba al otro lado del Sol (v. fig. 2-1). Pierre Simon Laplace observó la rotación perihelial de Mercurio[2]. Joseph Louis Lagrange se ocupó del complejo problema de los tres cuerpos, con la determinación cinemática de la órbita de tres masas en movimiento que se influyen recíprocamente. Sólo tiene solución el problema de los tres cuerpos «limitado»; cuando se puede suponer que una de las tres masas es mucho más reducida que las otras dos es posible prescindir de su efecto sobre las grandes.

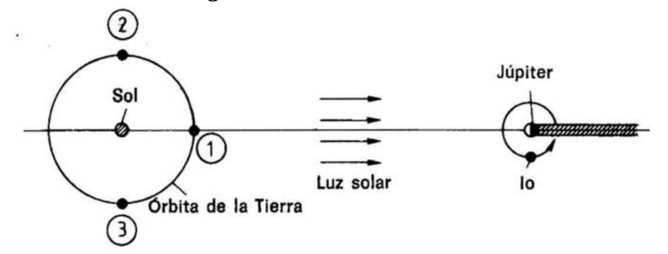


Fig. 2-1. Cálculo de la velocidad de la luz por Olaf Römer en 1676. Cuando la Tierra se encuentra en la posición (1), está más cerca de Júpiter que en las posiciones (2) o (3). El periodo de revolución de la luna de Júpiter lo se utiliza como reloj: los eclipses de Ío se observan antes cuando disminuye la distancia y tardan más en aparecer cuando ésta aumenta (pos. 1-pos. 2). Römer estableció la velocidad de la luz en 214.300 km/seg.

James Bradley descubrió la aberración de la luz (v. apéndice 1) y el ciclo de 18,6 años de la «nutación» del eje terrestre (v. fig. 2-2). En 1761 Edmund Halley observó el paso de Venus ante el disco solar —un acontecimiento poco frecuente, pues el plano de la órbita de Venus está inclinado con respecto al de la

[2] De esta cuestión nos ocuparemos con más detalle al final del capítulo 3

Tierra— desde diversos puntos de la Tierra y ello le permitió determinar la magnitud absoluta de los parámetros de la órbita venusiana, que hasta entonces sólo se conocían en términos relativos. En aquellos años se estudió la masa de los planetas a partir de los períodos de revolución de sus lunas: la masa de Venus se calculó a partir de las alteraciones de la órbita terrestre. La masa de Mercurio fue la única que no pudo determinarse correctamente, problema sobre el cual volveremos más adelante.

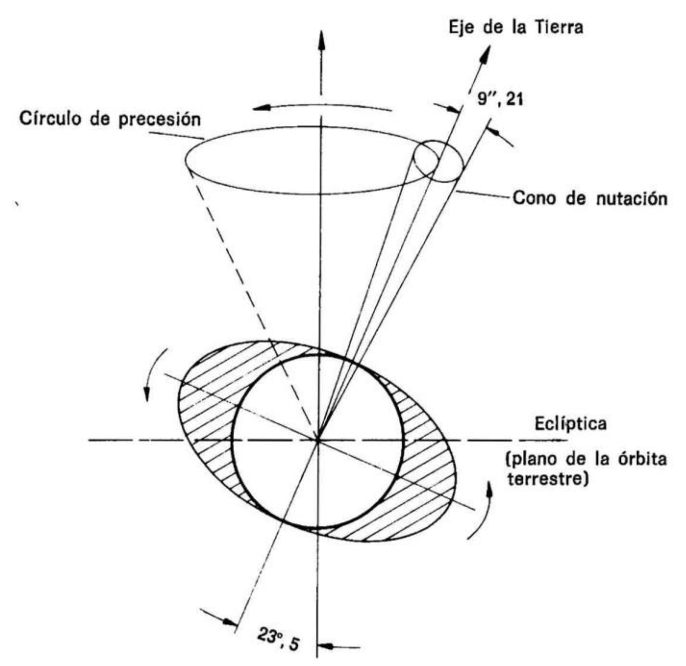


Fig. 2-2. Precesión del eje terrestre alrededor de la perpendicular a la eclíptica bajo el efecto de las fuerzas de gravitación del Sol y la Luna. El periodo de precesión se sitúa en torno a 25.700 años. El periodo de nutación, que hay que atribuir a la diferente magnitud de las fuerzas en la órbita terrestre, es de 18,61 años. En el dibujo se ha exagerado el ensanchamiento ecuatorial de la Tierra.

En 1772 Johann Elert Bode dio a conocer la regla, basada en las ideas de Kepler *(Mysterium Cosmographicum),* que Johann Daniel Titius formulara en 1766 e hizo referencia a la existencia de una órbita —por así decirlo— sin ocupar entre las de Marte y Júpiter. El 1 de enero de 1801 el italiano Giuseppe Piazzi localizaría en ese mismo punto el asteroide Ceres, Se conoce con el nombre de asteroides a los cuerpos con diámetros inferiores a 1.000 km que no son «lunas». Este hecho produjo una gran sensación en aquel momento, sobre todo después de que, en 1781, el descubrimiento del planeta Urano por el astrónomo William Herschel (1738-1822) hubiera causado ya una gran sorpresa entre los astrónomos. Siempre se había considerado al Sistema Solar como un sistema «cerrado». G. F. W. Hegel, el filósofo, publicó en 1801 su trabajo de habilitación como catedrático «sobre las órbitas de los planetas»; en él demostraba de un modo lógico (!) que no podía haber más de siete planetas... A la vista de los grandes avances de la física después de Newton, entre los científicos de aquel momento reinaba la eufórica idea de que por fin se habían descubierto y analizado todos los hechos importantes.

En 1846 se descubrió el planeta Neptuno y en 1930 pudo comprobarse la existencia de Plutón. El descubrimiento de Neptuno fue una especie de juego de detectives: a partir de las perturbaciones de la órbita de Urano, los astrónomos John C. Adams y Urbain J. Leverrier llegaron —cada uno por su cuenta— a la conclusión de que tenía que existir un planeta más. Cuando Johann Gottfried Galle exploró el lugar indicado desde el observatorio astronómico de Berlín, encontró enseguida el planeta en cuestión. Gracias, eso sí, a la afortunada circunstancia de que Neptuno era visible en aquel momento.

En el siglo XIX los físicos y los astrónomos disponían ya de instrumentos de medida muy perfeccionados y de unos recursos matemáticos bastante importantes. En 1823 J. Herschel consiguió conocer los espectros de las estrellas. Suponía —y estaba en lo cierto— que a partir del estudio de tales espectros se podría determinar la composición química de los astros. Éste fue el nacimiento de la astrofísica: a partir de entonces resultó

posible describir otros cuerpos celestes desde el punto de vista físico.

También se manifestó un gran interés por el origen del Sistema Solar. Laplace y Kant expresaron su idea de que el Sistema Solar tenía que haber surgido de una nube de gas por un colapso gravitacional. Hermann von Helmholt se ocupó en 1857 del origen de la energía solar. Partiendo de la idea del colapso gravitacional, calculó una tasa de contracción del Sol según la cual éste sólo podría haber producido energía durante 22 millones de años. Era imposible. Aunque ahora este problema es resoluble gracias a la fusión nuclear, entonces no se podía abordar con perspectivas de éxito. Tampoco era fácil avanzar en el estudio de los procesos físicos de otros planetas, ya que el nivel de conocimientos en este terreno seguía siendo más bien bajo.

El interés por el sistema planetario disminuyó a lo largo del siglo XIX. Se aprovecharon los conocimientos ya existentes, pero no se añadieron otros nuevos. Durante casi un siglo sólo los astrónomos aficionados se dedicaron a observar los planetas. La mayoría de los astrónomos se habían dedicado desde hacía tiempo al estudio de las estrellas. La verdadera exploración de los planetas no comenzó hasta la era de los viajes espaciales, especialmente a partir de 1970, con ocasión del lanzamiento de sondas. Desde entonces han aumentado en gran medida los conocimientos sobre los planetas. Son tantos los científicos de diversos países que han participado y participan en estos programas de investigación que por motivos de espacio resulta imposible citar sus nombres. Por ello ponemos aquí punto final a esta breve ojeada sobre la época histórica de la evolución de las ciencias naturales para centrarnos en la física de los planetas y mencionar sólo ocasionalmente a algunas figuras.

III. EL SISTEMA SOLAR: CONSIDERACIONES ASTRONÓMICAS

El astro central de nuestro sistema, el Sol, es una estrella: denominamos así a los cuerpos en cuyo interior se libera tanta energía que una parte considerable de ella sale al exterior. La producción y la emisión de esta energía están perfectamente dosificadas, aunque también puede ocurrir que la estrella explote (hablamos entonces de una estrella «nova» o «supernova»). De esta energía vivimos nosotros. Cae en forma de radiación electromagnética sobre la atmósfera terrestre, la calienta, provoca y mantiene su circulación, y calienta también la superficie de la Tierra, haciéndola habitable. Una parte de la energía sufre una serie de transformaciones químicas: se produce así el crecimiento de las plantas y toda la vida es posible gracias a la energía que nos llega desde el Sol.

Los hombres se dieron cuenta de esto en seguida y por eso encontramos tan a menudo al Sol en el ámbito de la religión los egipcios adoraban al dios del Sol Ra, los súmenos le daban el nombre de Utu, los indios hablaban de Gamda y los japoneses veneraban a la diosa del Sol Amaterasu En las edades antigua y media no se tenían apenas conocimientos acerca del Sol, y las nociones al respecto sólo empezaron a evolucionar hacia 1800 a partir del descubrimiento de las líneas de Fraunhofer en el espectro solar. Pronto se formularon las primeras teorías: en el siglo XIX se calculó la temperatura de la superficie solar a partir de su luminosidad Por el efecto gravitacional se conocía la masa del Sol, así como su distancia de la Tierra, con lo que se podía calcular también su volumen De esta manera se obtuvo el valor de su densidad media (v. tabla 3-1) y se dedujo que el Sol es una bola gaseosa de hidrógeno a muy alta temperatura, con pequeñas cantidades de otros elementos (sobre todo

helio, que fue descubierto por sus líneas espectrales en el espectro solar antes de que el químico inglés William Ramsay pudiera encontrarlo en el laboratorio).

Tabla 3-1. Principales datos del Sol

Radio	$6{,}96\times10^{10}$ cm = 109 R_T *	Velocidad de rotación en el ecuador	1,93 km/s
Masa	$1{,}966\times10^{33}$ g		
Densidad media	1,409 g/cm^3	Periodo de rotación	25,03 días
Aceleración de la gravedad en la superficie	$2{,}74\times10^4$ cm s^{-2}	A mayor latitud	27,62 días
Constante solar (flujo de energía en 1 UA.)	$1{,}36\times10^6$ erg cm^{-2} s^{-1} = 0,14 vatios/cm^2 (= 1,96 cal/min/cm^2)	Inclinación del eje de rotación respecto de la eclíptica	7º 15'
Producción energética	$3{,}90\times10^{33}$ erg/s	Espesor (fotosfera)	110 km
Temperatura de la superficie	5.780 ±10°K	Tipo espectral (enana amarilla)	G-2

* R_T: radio de la Tierra.

Por diversas fuentes sabemos (v. cap. 9) que el Sol se formó hace unos 4.600 millones de años y que desde entonces ha mantenido siempre la misma producción de energía con muy pequeñas oscilaciones. En consecuencia, la fuente de energía del Sol no ha de ser sólo gravitacional, y no puede tener un origen químico. Hoy estamos convencidos de que la producción de energía en el Sol responde a un proceso termonuclear: cuatro núcleos de hidrógeno se funden en un núcleo de helio en virtud de una serie de choques, liberándose por cada núcleo de helio formado una energía de 26,21 M*e*V o $4{,}2\times10^5$ ergios.

Este proceso —del que no nos vamos a ocupar aquí con más detalle— transcurre en el núcleo interno del Sol. La energía de 10^{33} ergios/seg producida sale hacia el exterior, primero por radiación, y en las capas externas por convección Al observar la superficie solar, las estructuras que reflejan el flujo convectivo de energía aparecen como una red de células de convección en la «granulación» (fig. 3-1). El flujo convectivo podemos describirlo como una burbuja de gas de baja densidad pero elevada temperatura que asciende en un material más frío (se habla de una «inestabilidad convectiva»). De esta zona de convección

pasan a la fotosfera —la superficie visible del Sol— ondas sonoras que, debido a la rápida disminución de la densidad, se convierten en ondas de choque y calientan las capas superiores. Pero la disminución de la densidad determina también una reducción relativa de la energía cinética del flujo de gas con respecto a la energía ahora dominante acumulada en campos magnéticos locales.

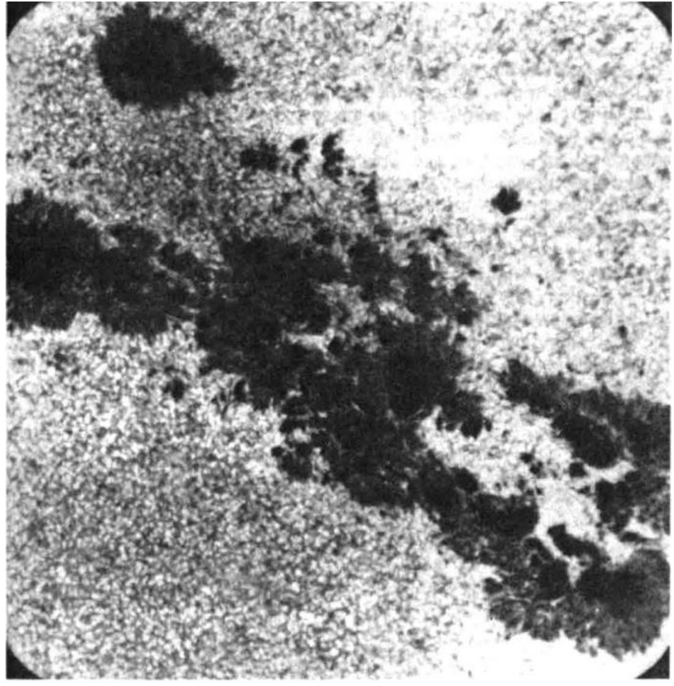


Fig. 3-1. La convección en las capas más profundas del Sol provoca el ascenso de burbujas de gas a mayor temperatura. Durante su rápido ascenso, estas burbujas no ceden calor al exterior. Cuando la diferencia de temperatura es muy grande, el flujo se hace inestable y se rompe. Las «células de convección» se aprecian al observar estas capas longitudinalmente. Forman la «granulación» de la superficie solar, similar a la parte superior de las formaciones nubosas. Las estructuras oscuras son manchas solares que en ocasiones se aprecian a simple vista en el Sol. (Fotografía: Sacramento Peak Observatory.)

La temperatura ha descendido a 6.000 grados. La fotosfera es gaseosa y podemos observarla gracias a que la «atmósfera» del Sol es muy transparente. No podemos hacer otro tanto, en cambio, con las capas interiores. De ahí que todas las medidas dimensionales se refieran a esta superficie visible. A nuestros ojos el Sol es como un disco brillante con un radio de 16' 17",82 [3] en el perihelio de la Tierra y de 15' 45",67 en el afelio de nuestro planeta[4].

En la órbita terrestre un cuerpo de 1 cm^2 de superficie recibe una energía de 0,14 vatios, la llamada «constante solar» (tabla 3-1). De ella, un 47% llega a la superficie de la Tierra, una parte se irradia al espacio y un 17% permanece en la atmósfera e influye en nuestro clima. La cantidad de energía recibida es muy importante: 1,4 kW por metro cuadrado, $1{,}8 \times 10^{14}$ kW aproximadamente en toda la superficie terrestre (radio medio de la Tierra R, = 6.378 km).

La temperatura de la superficie de un cuerpo se calcula a partir de la distribución de la radiación electromagnética emitida por ese cuerpo. El máximo de la emisión solar se localiza en una longitud de onda de 4.680 Å. Con ello se obtiene una temperatura de la superficie solar de 5.780°K. Acerca de la estructura interna del Sol nada sabemos por vía directa. Sólo conocemos la masa, la densidad media y la temperatura de la superficie. Sin embargo, con la ayuda de argumentos teóricos se pueden construir algunos modelos que hacen referencia a la estructura interna. Existe cierta seguridad de que los modelos diseñados se ajustan bastante bien a la realidad.

A estos modelos se llega cuando se equilibran las fuerzas siguientes (los cuerpos son estables): presión del gas, presión de radiación y fuerza de gravitación. Junto al equilibrio de las fuerzas debe existir también un equilibrio de la radiación. Con ello se obtiene el gradiente de la presión y la temperatura como

---

[3] 16 minutos y 17,82 seg: 60 seg son 1 min, 60 min = 1 grado y 360 grados la circunferencia.

[4] Afelio: punto de la órbita más alejado del Sol. Perihelio: punto de la órbita más próximo al Sol.

función de la distancia con respecto al centro del Sol. Con una presión de 221.000 millones de atmósferas y una densidad de 134 g/cm^3 la temperatura alcanza valores próximos a los 15 millones de grados. Con temperaturas tales todos los átomos están ionizados. En esta zona se realiza la producción de energía termonuclear que ha permitido que los valores se mantengan prácticamente inalterados desde que se formó el Sol. Por ello, en el interior de nuestra estrella es menor la proporción de hidrógeno (49% H, 49% He, 2% otros elementos), no en vano éste se «consume».

La zona de convección se encuentra justo debajo de la fotosfera, de 400 km de espesor. Se caracteriza por un cambio brusco de temperatura: la zona de convección mantiene la parte inferior de la fotosfera a una temperatura constante de unos 9.000°, mientras que la parte superior se enfría progresivamente hasta alcanzar los valores medios indicados más arriba, el borde exterior de la fotosfera tiene una temperatura de 4.300°.

En la fotosfera se localizan también las manchas solares (fig. 3-1), que generalmente aparecen en grupos. Estas manchas presentan una menor temperatura que su entorno, por lo que se ven más oscuras que la zona caliente y brillante de su alrededor. Su radiación se reduce al 30% de la del resto de la superficie solar. Las manchas solares aparecen y desaparecen: aparecen a altas latitudes (~30') al comienzo de un ciclo de actividad solar, al final del cual se encuentran ya próximas al ecuador (v. fig. 3-2). Este desplazamiento está en relación con la «rotación diferencial» del Sol: la región ecuatorial gira a mayor velocidad que las latitudes más altas (v. tabla 3-1). El número de manchas solares que se observan en el disco solar se utiliza como medida de la «actividad» del Sol. Muchas manchas indican la existencia de un sol activo: pocas, la presencia de un sol «tranquilo». Las regiones «activas» del Sol duran generalmente unos días, a veces algunos meses. Por ello, para medir el grado de actividad solar se utiliza el «número relativo de manchas solares» R, calculado a diario en Zurich hasta el año 1980 basándose en observaciones realizadas en todo el pla-

neta. En 1980 se interrumpió esta empresa por motivos financieros. Es posible que un instituto belga continúe calculando el número relativo de manchas solares. También se está intentando hallar con métodos radioastronómicos una magnitud medida relacionada con la aparición de manchas.

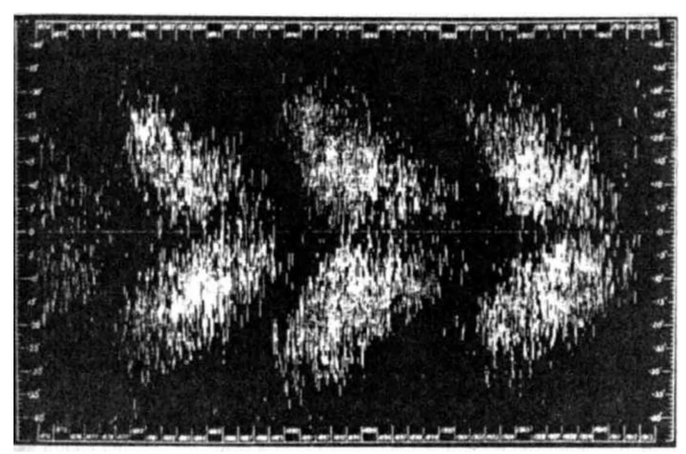


Fig. 3-2. Formación de las manchas solares: al principio del ciclo aparecen manchas en altas latitudes (–30°), mientras que al final se localizan en zonas más próximas al ecuador. Los datos corresponden a los años 1874 a 1913 y han sido tomados del libro *Geomagnetism*, de Chapman y Bartels. Oxford. Oxford Press, 1951.

El número relativo de manchas solares constituye una serie temporal (la única de este tipo) que se remonta sin interrupción hasta el año 1750. En la figura 3-3 se observa cómo el número relativo de manchas solares ha oscilado, al menos en los últimos tiempos, en ciclos de aproximadamente 11 años. Pero cada 11 años cambia también la polaridad del campo magnético vinculado a las manchas (hasta 100 gauss = 0,01 tesla), de modo que el ciclo dura en realidad 22 años. Las manchas solares constituyen un fenómeno hidromagnético, dinámico, sumamente complejo, que todavía hoy está sin describir de modo detallado desde el punto de vista físico. Es probable que el campo magnético local impida el calentamiento de la región de la mancha y la haga aparecer con una tonalidad más oscura.

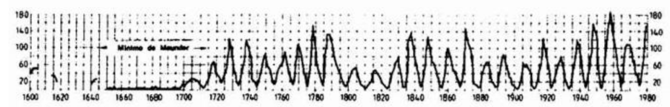


Fig. 3-3. Número relativo de manchas solares de Zurich: número de manchas que aparecen en el disco solar calculado a diario en el observatorio astronómico de Zurich a partir de observaciones practicadas en todo el planeta (la cifra es relativa porque se realiza una ponderación con arreglo a las distintas observaciones). Este número indica el grado de actividad del Sol. John A. Eddy prolongó la serie hasta el año 1600 basándose en el número de manchas solares calculado con posterioridad.

La capa gaseosa que envuelve a la fotosfera se denomina cromosfera. Desde el punto de vista físico se caracteriza por una rápida disminución de su densidad a medida que se aproxima al exterior. Tiene un espesor de unos 8.000 km y en caso de eclipse total de Sol rodea al disco solar formando una brillante corona de color rojo, de ahí su nombre. Recubriendo la cromosfera se encuentra la corona (fig. 3-4), en la que la temperatura asciende de nuevo y puede alcanzar valores próximos a los 6 millones de grados. La corona se puede observar en el curso de los eclipses de Sol (pues brilla mucho menos que la fotosfera): durante el mínimo de actividad solar como una estructura brillante más destacada en la zona del ecuador; durante el máximo como una corona simétrica que rodea al Sol. Debido a la elevada temperatura, en la corona los átomos están ionizados, es decir, han perdido más de un electrón: el hierro, por ejemplo, ha perdido entre 9 y 16 electrones, el oxígeno 6, etc.

El Sol es una radiofuente extraordinariamente intensa. Incluso el «Sol tranquilo» emite radiaciones, simplemente como consecuencia de la elevada temperatura de su superficie (radiación térmica). Pero también existe una radiación relacionada con la actividad solar («radiotempestades»). Conocemos una serie de fenómenos que se dan en la Tierra (p. ej., las tempestades magnéticas) y cuya aparición está vinculada con la actividad del Sol. Éste emite continuamente gas ionizado y un plasma, que recibe el nombre de «viento solar» (cap. 14) y que alcanza velocidades que pueden oscilar entre los 200 y los

1.000 km/seg. Este viento llega a la magnetosfera terrestre después de haber recorrido en unos 4 días los 150 millones de km que separan al Sol de la Tierra. El campo magnético terrestre, que queda confinado en la «magnetosfera» protegiendo a la Tierra como un paraguas contra el viento solar, reacciona frente a las modificaciones que se producen en este viento solar; de este modo resulta comprensible que las oscilaciones magnéticas que se pueden registrar en la superficie terrestre —cuando son muy intensas se denominan tempestades magnéticas— aparezcan con este retraso con respecto al Sol (fig. 3-5).

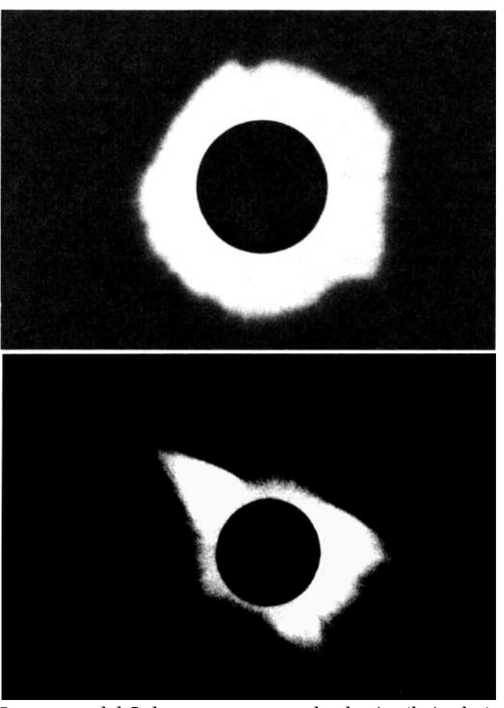


Fig. 3-4. La corona del Sol en un momento de alta (arriba) y baja (debajo) actividad solar



Fig. 3-5. Representación temporal de la aparición de agujeros en la corona, de la velocidad del viento solar y de un índice que muestra la actividad del campo magnético terrestre Las zonas oscuras corresponden a los valores más bajos y las claras a los más altos. Cada línea horizontal refleja un periodo de 27 días —una rotación del Sol—. La coincidencia de las zonas claras deja ver la estrecha relación existente entre las corrientes rápidas del viento solar y los agujeros en la corona, por un lado, y la actividad geomagnética, por otro.

A simple vista no se aprecian estas modificaciones: afortunadamente, pues esta parte del espectro procede de la fotosfera y es muy estable. En cambio, de la cromosfera y de la corona, situadas por encima, proceden las partes fuertemente variables del espectro electromagnético en la zona de los rayos X y en la de radioondas de mayor longitud de onda. La primera aumenta la conductividad de la ionosfera de los planetas a través, por ejemplo, de la ionización. La actividad solar se refleja también en las protuberancias que se pueden observar en los bordes del Sol: allí el gas brillante es lanzado a lo largo de líneas de fuerza magnéticas hasta alturas que pueden superar los 10.000 km. Vistas longitudinalmente, estas erupciones aparecen como «filamentos» oscuros que destacan sobre la fotosfera, más clara

La actividad solar es un fenómeno cuyas raíces tienen que estar en las capas más profundas del Sol. Una serie de hechos respaldan esta idea: las nuevas regiones activas aparecen preferentemente en zonas de campos magnéticos locales débiles o de grupos de manchas jóvenes. Estas regiones activas no surgen por casualidad: se forman en las latitudes en las que suelen aparecer las manchas y se agrupan en «latitudes activas» que pueden extenderse 30-60°.

Eventualmente la actividad solar se refleja en potentes erupciones queen la actualidad suelen denominarse con el nombre inglés de «flare» Estas fulguraciones aparecen en las proximidades de las manchas solares. En momentos de alta actividad pueden producirse fulguraciones cada dos horas. Las fulguraciones más grandes proceden de zonas cuya superficie supera a veces los 5×10^{20} cm^2. En estas zonas el campo magnético puede alcanzar intensidades superiores a los 1.000 gauss antes de la fulguración. Las fulguraciones menos intensas duran, por lo general, unos minutos, mientras que las más notables se prolongan durante dos o tres horas. Se desarrollan en el plazo de 100-1.000 segundos y emiten radiación electromagnética con longitudes de onda de 10^{-10} cm (rayos gamma) a 10^6 cm (radioondas) así como partículas ionizadas.

La energía que se transforma en la fulguración alcanza un cierto porcentaje de la energía almacenada en el campo magnético del grupo de manchas (más de 10^{32} ergios). Durante una fulguración las partículas con carga eléctrica son aceleradas hasta alcanzar energías muy elevadas. Los electrones que se mueven en el campo magnético emiten radiación sincrotrón en la zona de radioondas; al entrar en la atmósfera del Sol, más densa, se produce una radiación de frenado, rica en energía. Los iones cargados positivamente pueden ser acelerados por las ondas de choque hasta alcanzar energías de varios miles de millones de electronvoltios. Estas partículas se mueven en órbitas en espiral a lo largo del campo magnético interplanetario y pueden llegar a la Tierra 30 min después del máximo de la fulguración: las que tienen más energía se hallan en condiciones de alcanzar incluso la superficie terrestre. En una fulguración se pone en movimiento materia solar con una masa de

10^{16}-10^{17} g. La figura 3-6 muestra cómo se expande en el espacio interplanetario una onda provocada por una erupción de este tipo. La fuente de la emisión óptica en la fulguración se localiza en la cromosfera y, en parte, en la corona inferior. En los casos de fulguraciones muy intensas se pueden ver afectadas también algunas zonas de la fotosfera. Las fulguraciones se clasifican según las dimensiones de la zona afectada y según su luminosidad. Las menos intensas reciben en inglés el hombre de *subflares*.

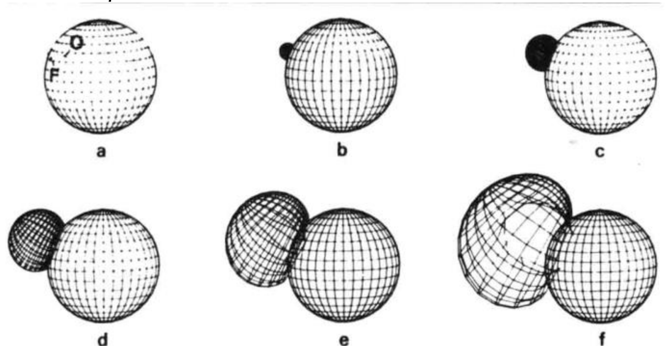


Fig. 3-6. Una simulación realizada por computador muestra cómo se expande en el espacio una onda de choque a partir de una fulguración en el Sol.

En 1859, el astrónomo inglés R. C. Carrington observó por primera vez, de manera casual, una fulguración. Unos días después de la observación se produjo una fuerte tempestad magnética en la Tierra, al tiempo que se podía ver la aurora boreal en el sur de Inglaterra —lo que no es nada frecuente—. En una reunión de la Royal Society en Londres. Carrington expuso la posibilidad de que existiera una conexión entre ambos hechos, pero Lord Kelvin, uno de los más prestigiosos científicos del momento, negó esta posibilidad con argumentos aparentemente convincentes. Hasta el descubrimiento de la «ultrarradiación del Sol» en el año 1942 por A. Ehmert. W. Lange y S. Forbush no existió una prueba experimental de que las partículas solares ionizadas podían llegar a la Tierra. Fue la hipótesis

del viento solar de Ludwig Biermann, a la que E. Parker procuró una base teórica sólida, la que permitió ver la relación «correcta».

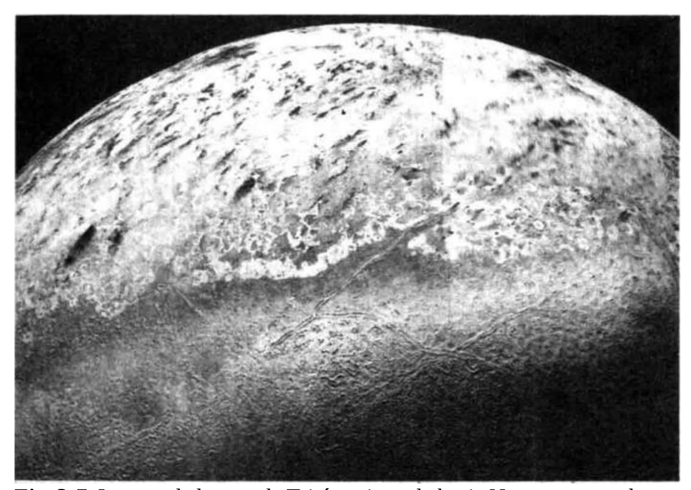


Fig. 3-7. Imagen de la cara de Tritón orientada hacia Neptuno, tomada por la sonda interplanetaria Voyager 2, que muestra cráteres mucho más pequeños, motivo por el cual se sospecha que su edad es de mil millones de años. El casquete del polo sur, iluminado desde hace 30 años por el Sol, está todavía cubierto por nitrógeno helado. La estructura incluye otros tipos de hielos (p. ej., de metano y etano). No se ha detectado hielo de agua. De las grietas de la superficie puede emanar de manera explosiva material de zonas de alta presión (transición de fase del N_2), con velocidades de 250 m/s, hasta altitudes de 40 km. Dicho material es arrastrado horizontalmente por vientos que llegan a alcanzar velocidades de hasta 150 m/s. La atmósfera está formada por nitrógeno con trazas de metano, y hasta etano. Debido a la precesión de la órbita (23° respecto del ecuador de Neptuno), Tritón presenta una secuencia compleja de estaciones.

Mercurio. Venus, la Tierra. Marte. Júpiter. Saturno, Urano. Neptuno y Plutón son los planetas del Sistema Solar: en la figura 3-7 se muestran sus órbitas de modo esquemático. Estos planetas se pueden dividir en tres categorías: 1) el grupo de planetas terrestre, que está compuesto fundamentalmente por elementos pesados: 2) Júpiter y Saturno, en los que predominan

el helio y el hidrógeno, pero que pueden tener igualmente núcleos de material pesado, y 3) Urano y Neptuno, que se supone tienen un núcleo mayor y más pesado, pero que parecen estar envueltos por una densa cubierta gaseosa. Es posible que Plutón se incluya también en este grupo, pero sabemos tan poco acerca de él que por el momento será suficiente con mencionarlo.

En la tabla 3-2 se recogen los principales datos acerca de los planetas. Según pueden apreciarse, el más pequeño es Mercurio. Un tamaño inferior presentan los asteroides (también denominados pequeños planetas o planetoides), cuyo diámetro puede ser inferior a los 1.000 km. Se calcula que existen unos 40.000 en el Sistema Solar, si bien sólo se conocen la órbita y la masa aproximada de 1.750. A los cuerpos de dimensiones aún más reducidas se les denomina meteoritos que en caso de llegar a la zona de atracción de la Tierra, suelen extinguirse en la atmósfera. La estela luminosa que se forma en estos casos recibe el nombre de meteoro. Al material de dimensiones más reducidas se le denomina sencillamente «polvos y de él también existe una gran cantidad en el Sistema Solar, probablemente procedente de las estrellas (v. cap. IX). En el Sistema Solar hay también gas (gas neutro) de diferentes orígenes y plasma que fluye desde el Sol (viento solar), que llena el sistema planetario de átomos ionizados; de este modo se forma la «heliosfera», de la que nos ocuparemos en el capítulo XIV. Por último, hay que hacer mención de los cuerpos más exóticos del Sistema Solar: los cometas.

Se trata de cuerpos con un diámetro de tan sólo algunos kilómetros: sus órbitas son muy excéntricas y al acercarse al Sol pierden grandes cantidades de gas y polvo. Muchos de ellos presentan largos períodos de revolución alrededor del Sol: los que muestran períodos más cortos han debido ser llevados a tales órbitas por perturbaciones provocadas por las estrellas y/o los planetas. Existen varios ejemplos de ello, como el del cometa «Brooks 2», que en 1886 redujo su período de revolución de más de 31 años a unos 7 años después de haber pasado por las proximidades de Júpiter.

Tabla 3-2. Características de los planetas

	☿ MERCURIO	♀ VENUS	♁ TIERRA	♂ MARTE	♃ JUPITER	♄ SATURNO	♅ URANO	♆ NEPTUNO	♇ PLUTON
Distancia media del Sol (km) × 10^6	57,9	108,2	149,6	227,9	778,3	1.427	2.869,6	4.496.6	5.900
Distancia media del Sol (UA)	0,387	0,7233	1	1,524	5,203	9,539	19,18	30,06	39,44
Periodo sidéreo de revolución alrededor del Sol	88 d	224.7 d%	365,26 d	686,98 d	11.862 a	29.458 a	84.014 a	164,79 a	247,7 a
Excentricidad de la órbita[1]	0,206	0.007	0,017	0.093	0.048	0,056	0,047	0,009	0,25
Periodo de rotación (sidéreo)	58,646 d	–243,16 d	$23^h56^m4^s$	$24^h37^m23^s$	$9^h50^m30^s$	$10^h39^m24^s \pm 7^S$	$17{,}29^h \pm 0{,}1^h$	16^h3^m	6,39 d
Velocidad orbital media (km/s)	47.85	35,02	29.78	24.15	13,03	9,65	6.8	5,44	4.75
Inclinación de la órbita respecto de la eclíptica	7º	3º,4	0°	1°,9	1°,3	2°,5	0º,8	1º,8	17°,2
Inclinación del eje respecto a la perpendicular del plano de la órbita	2º ± 3	3º	23°27’	23°59’	3°5'	26°44'	82°5’	28°48'	50° (?)
Radio en el ecuador (km)[6]	2.440	6.051	6.378	3.389,9 ± 0,04	71.714 ± 25	60.330	25.600	24.765	1.150 ± 7
Achatamiento[2]	~0	~0	0,003	0,006	0,065	0,1	0,06	0,02	?
Masa (Tierra = 1)[3]	0,055	0,815	1	0,108	318,1	95.147	14.53	17,2	0,1
Masa (porcentaje de la masa del Sol)	0,000017	0.000248	0,000304	0,000033	0.09677	0,0289	0,0044	0,0052	0,00003
Densidad media (g/cm³)	5,432 ± 0,009	5,248 ± 0,004	5,52	3,933 ±0,0018	1,33	0,674	1,24	1,64	2,1
Atmósfera Componente principal	He (0,98) H (0,02)	CO_2 (0,96) N_2 (0,035)	N_2 (0,77) O_2 (0,21)	CO_2 (0,96) N_2 (0,027) Ar (0,016)	H_2 (0,89) He (0,11)	H_2 (0,89) He (0,04)	H_2 (0,83) He (0,15) CH_4 (0,02)	H_2 (0,85) He (0,15) CH_4 < 1%	?

	9 MERCURIO	♀ VENUS	♁ TIERRA	♂ MARTE	♃ JUPITER	♄ SATURNO	♅ URANO	♆ NEPTUNO	♇ PLUTON
Temperatura media de la superficie (de día) (grados Celsius)	350	482	22	–23	–148	–179	–221 ± 2 (100 mb)	–214 ± 1	–230
Aceleración de la gravedad (Tierra = 1)	0,37	0,88	1	0,38	2,64	1,15	1,17	1,18	?
Constante solar (Tierra = 1)[4]	6,68	1,91	1	0,43	0,037	0,011	2.7×10^{-3}	$1,1 \times 10^{-3}$	$6,4 \times 10^{-4}$
Número de lunas[5]	0	0	1	2	15	17	15	8	1
Momento magnético (tesla cm^3)	3.3×10^{18}	$< 1 \times 10^{18}$	$8,06 \times 10^{21}$	$\leq 2,5 \times 10^{17}$	$\leq 1,55 \times 10^{26}$	$4,6 \times 10^{24}$	$3,86 \times 10^{23}$	$2,020 \times 10^{23}$	?
Radio del núcleo (km)	1.800	3.000	3.486	1.700	52.000	28.000	?	?	?
Distancia de las magnetopausas (radios de los planetas)	1,5		10	1,3	~ 100	~ 23	17,8	~ 20	?
Ángulo entre el eje magnético y el eje de rotación	10°	—	11,5°	(10°)	11,3°	0,7 ± 0,35	60°	47°	
Presión atmosférica en la superficie (bares)	2×10^{-15}	91	1	0,007	> 100	> 100	> 100	> 100	?
Peso molecular medio de la atmósfera	—	44	29	44	2	2	3	3	?

[1] La excentricidad es la relación entre la diferencia de los semiejes y el semieje mayor de la órbita.
[2] Se denomina achatamiento a la relación entre la diferencia de los radios ecuatorial y polar y el radio ecuatorial.
[3] Masa de la tierra $M_T = 5,976 \times 10^{27}$ g; masa de Jupiter $M_J = 1,901 \times 10^{30}$ g; masa del Sol $M_S = 1,966 \times 10^{33}$ g.
[4] Constante solar de la Tierra $1,4 \times 10^6$ erg/cm^2 seg.
[5] Según datos de finales de 1986.
[6] En el caso de los planetas exteriores el radio corresponde al nivel de 0,1 bar.

Los datos proceden de diferentes fuentes. La mayor parte se ha tomado de D. Morrison, D. P. Cruikshank y J. A. Burns, «Introducing the Satellites», en *Planetary Satellites.* J .A. Burns. Editor, University of Arizona Press, págs. 3-17, 1977. Se han corregido las cifras en los casos en que se disponía de datos más recientes. Éstos han sido tomados de la bibliografía indicada en la tabla 8-1, así como de varios números de EOS, Transactions. American Geophysical Union, vol. 60, 1979, y vol. 61, 1980.

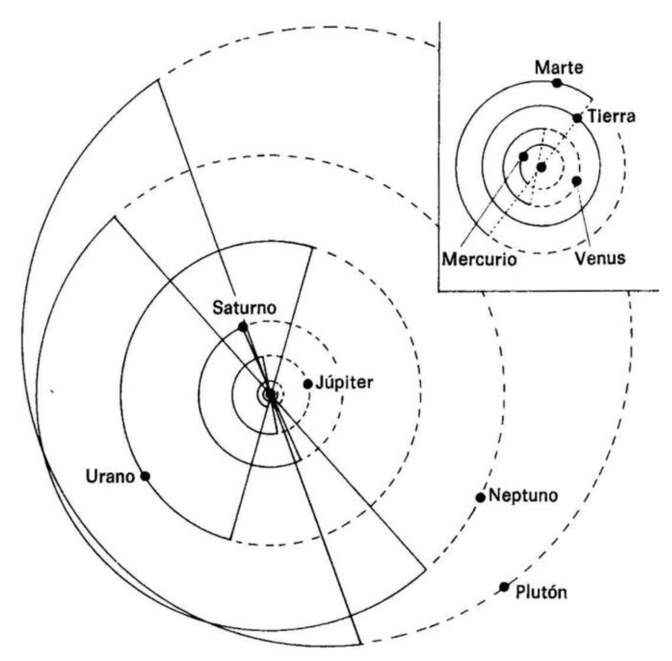


Fig. 3-8. Estructura del sistema planetario. Las órbitas se han dibujado más o menos a escala. Las líneas de trazos se encuentran por debajo del plano de la eclíptica.

En este «inventario» del Sistema Solar hay que mencionar también las lunas de los diferentes planetas. Comencemos por el planeta más próximo al Sol: por lo que se sabe, Mercurio no tiene ninguna luna; Venus tampoco. La Tierra cuenta con una: la Luna por antonomasia. Marte posee dos lunas. Júpiter ha aumentado hace poco tiempo en dos el número de las suyas, lo que hace un total de 15; las dos últimas fueron descubiertas en las imágenes tomadas por la sonda norteamericana «Voyager» en su aproximación al planeta. Saturno cuenta al menos con 15 lunas. Urano con 5 y Neptuno con 2. Plutón tiene también una luna, que ha sido descubierta recientemente. Júpiter. Saturno y Urano están rodeados por anillos de polvo: es probable que la

Tierra haya tenido hace tiempo un anillo y que Neptuno lo tenga en la actualidad.

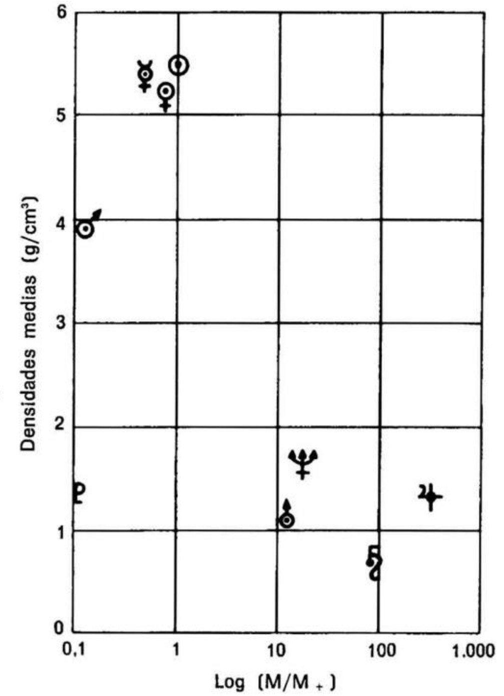


Fig. 3-9. Las densidades medias de los planetas como función de sus masas (se representa el logaritmo del coeficiente de las masas de los planetas por la masa de la Tierra). Se aprecian tres grupos: los planetas interiores, Júpiter y Saturno, y los planetas exteriores.

Los planetas se mueven alrededor del Sol describiendo órbitas elípticas que, con la excepción de Mercurio y Plutón, se encuentran en el plano de la eclíptica —el plano definido por la órbita terrestre—. La excentricidad de las elipses es, excepto en los casos de Mercurio y Plutón, muy pequeña: la mayoría de las órbitas de los planetas son prácticamente circulares. Éste es precisamente el motivo por el que se ha tardado tanto en descubrir que las órbitas son elípticas.

La densidad media de los planetas disminuye a medida que aumenta la distancia entre éstos y el Sol (fig. 3-9). Los planetas terrestres son cuerpos sólidos; los exteriores, en cambio, se parecen al Sol en lo relativo a su densidad (1,44 g/cm^3). Ello nos lleva a pensar que el hidrógeno es el principal elemento de estos planetas. Pero tras este hecho se oculta de nuevo una interesante historia que comentaremos al hablar del origen del Sistema Solar.

Mercurio ha llamado la atención a los físicos por un motivo diferente: su órbita no quedaba completamente explicada con la mecánica de Newton. Con su ley de la gravitación Newton justificó las leyes de Kepler y resolvió el problema de los dos cuerpos, nombre que recibe el problema matemático del movimiento de dos cuerpos en su campo de gravedad común. Pero, dado que en el espacio hay más de dos cuerpos con efectos gravitacionales recíprocos, hay que resolver el problema para *n* cuerpos. Desde el punto de vista matemático esto significa que es necesario encontrar una fórmula o un conjunto de fórmulas que definan para todos los tiempos de qué modo se van a mover los *n* (3, 4, 5 o más) cuerpos. Pero este problema es tan complejo que todavía hoy está sin resolver y es probable que no se resuelva nunca. En tales casos, los matemáticos suelen buscar soluciones aproximadas. Esto se consigue cuando se pueden demostrar las causas físicas que explican, por ejemplo, que una fuerza sea mucho menor que otra. En el caso del movimiento de la Luna alrededor de la Tierra habría que resolver un problema de tres cuerpos, pues la influencia de los demás planetas es muy pequeña en comparación con la del Sol, la Luna y la Tierra. Pero dado que la masa de la Luna es muy pequeña en comparación con las de la Tierra y el Sol, la cuestión se reduce a un «problema de los tres cuerpos reducido». Otro tanto ocurre con el movimiento de los satélites terrestres alrededor de la Tierra, pudiéndose considerar el satélite artificial como un punto de masa. De este modo se han calculado todas las órbitas, al considerar como pequeñas perturbaciones las fuerzas ejercidas por los demás planetas. Con ello se han descrito de modo exacto y satisfactorio las órbitas de todos los planetas excepto Mercurio.

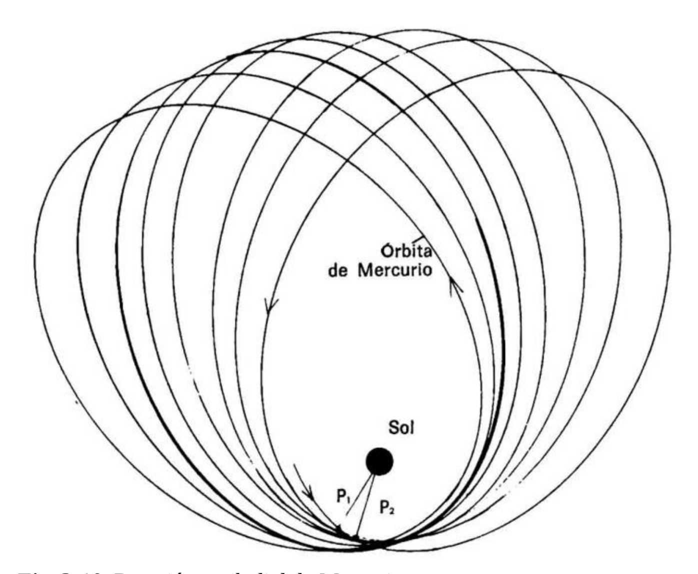


Fig. 3-10. Rotación perihelial de Mercurio.

En pocas palabras: la influencia de los demás planetas determina que la elipse de la órbita de uno de ellos gire alrededor del astro central, esto es, que no esté totalmente fija en el espacio. Este movimiento es muy lento, pero se puede medir. También es posible expresarlo de otro modo: un planeta no se mueve describiendo exactamente una elipse, debido a las fuerzas perturbadoras de los demás. Así, por ejemplo (fig. 3-10), un planeta que abandona un determinado punto en el espacio el día 1 de enero, transcurrido un año no se encontrará de nuevo en este mismo punto, sino muy cerca, en un lugar que después de girar la órbita elíptica alrededor del Sol en un determinado ángulo se puede considerar como si fuera de nuevo el punto inicial de la elipse. Si se trazara una línea recta que uniera el Sol y el punto de la órbita más próxima al Sol y se volviera a trazar una línea similar un año después, se podría ver que ambas líneas forman un ángulo entre sí. Esto es lo que se denomina una rotación perihelial, que no se daría si no existieran los demás planetas. En una órbita circular no tendrá lugar tal

rotación, que es tanto mayor cuanto más excéntrica se muestra la elipse. Dado que la órbita elíptica de Mercurio es la segunda más excéntrica de todas las de los planetas[5], su rotación perihelial resulta ser la más marcada y la que permitió realizar este descubrimiento: el semieje mayor de la órbita de Mercurio se desplaza hacia el este (observando la eclíptica en sentido longitudinal desde el norte, en el sentido de las agujas del reloj) ~5.5 seg por año. El astrónomo francés Leverrier señaló a mediados del siglo pasado que este movimiento era en realidad unos 0,5 seg mayor de lo que se pensaba en teoría. Debido a la extraordinaria exactitud de las observaciones había que considerar esta pequeña diferencia como significativa, y precisamente por ello despertó el interés de físicos y astrónomos: ¿cómo podía resultar de pronto insuficiente la importante teoría de la gravitación de Newton? Se buscó un planeta dentro de la órbita de Mercurio, pero no se halló ninguno. El problema de Mercurio quedó sin resolver.

A comienzos de este siglo se pusieron de manifiesto otras contradicciones en las distintas disciplinas físicas y la mecánica de Newton, aparentemente tan sólida, tampoco pudo resolverlas: es el caso, por ejemplo, del fenómeno de la velocidad de la luz, o del de la radiación térmica de los cuerpos. La física del siglo XX estuvo marcada en su origen por estas contradicciones. La rotación perihelial de Mercurio no fue correctamente explicada hasta la publicación, en 1916, de la «teoría de la relatividad general» de Einstein. Esta incluía la mecánica de Newton (y por tanto, también su ley de la gravitación) como un caso especial. La primera vez que se puso a prueba la teoría de Einstein fue con ocasión del cálculo del movimiento de un cuerpo pequeño alrededor de una estrella; lo hizo Karl Schwarzschild, de la Universidad de Gotinga, en 1917. Su aplicación a Mercurio proporcionó el valor total de la rotación perihelial. La desviación de la geometría en campos de gravitación fuertes respecto de la plana, euclidiana, determina la aceleración de la rotación perihelial, que, aunque en el Sistema

[5] La excentricidad de Plutón es mayor, pero más difícil de observar.

Solar es muy pequeña, *r* resulta decisiva en las proximidades de estrellas de gran masa. La moderna astrofísica resulta impensable sin la aplicación de la teoría de la relatividad general.

IV. MERCURIO, VENUS, LA TIERRA, MARTE: LOS PLANETAS INTERIORES

Mercurio (fig. 4-1), el planeta más próximo al Sol, es casi tan luminoso como Sirio. Desde la Tierra se le ve muy oscuro debido al deslumbramiento producido por el Sol. Por eso, sólo se puede observar poco antes de la salida del Sol (cuando se encuentra al oeste de éste) o poco después de la puesta (cuando se encuentra al este): esto aparte, no se separa más de 28º del Sol (desde nuestra perspectiva) Los griegos le denominaron, como estrella de la tarde. Hermes, y como estrella de la mañana. Apolo: los romanos «abreviaron» y le dieron el nombre de Mercurio. Durante mucho tiempo se ha sabido muy poco acerca de sus características Su período de rotación («spin»), de 58,65 días, sólo se ha podido determinar recientemente con la ayuda de los modernos métodos de radar. Se trata exactamente de las dos terceras partes de su período de revolución alrededor del Sol (88 días). Esto se explica por un acoplamiento del «spin» y la órbita que, a través del rozamiento de las mareas (v cap. 8), suprimió el impulso de giro original y provocó una resonancia. Con la ayuda de la sonda norteamericana Mariner 10, que en 1974 pasó a unos cientos de kilómetros de Mercurio, se pudieron conocer más detalles sobre este planeta. Sus cámaras consiguieron imágenes de la superficie —se fotografió aproximadamente el 40% de la misma— con una resolución cinco mil veces mayor. Mercurio recibe del Sol unas diez veces más energía que la Tierra, lo que determina que de día se alcance una temperatura de 700ºK (grados Kelvin), que por la noche desciende a 100ºK. Debido a la lenta rotación del planeta, la velocidad angular del movimiento orbital en el perihelio es mayor que la de rotación, por lo que el planeta se mueve primero de este a oeste del Sol, luego, y durante un cierto tiempo, de oeste a este y a continuación de nuevo de este a oeste. La resonancia del «spin» y la órbita determinan que

esto suceda siempre a la misma longitud, a 0º y a 180º. Estas longitudes reciben, por tanto, dos veces y media más energía que el resto del planeta. Un observador situado en Mercurio vería en el perihelio cómo el Sol se mueve en el cielo durante una semana de un modo muy singular. Debajo de la superficie en el ecuador se hallan temperaturas siempre por encima de los 0°C; en los polos, por el contrario, las temperaturas nunca alcanzan esos 0º.

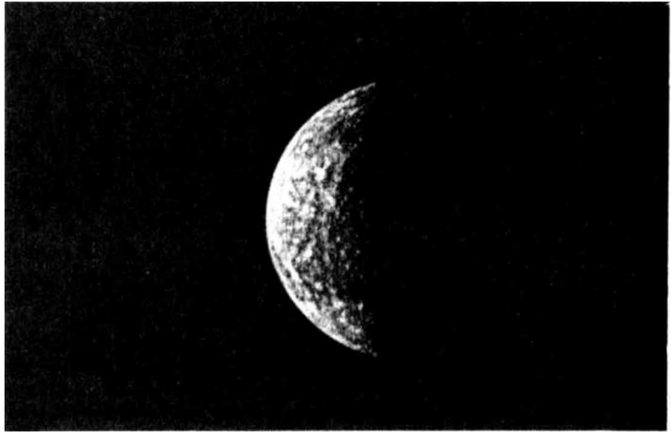


Fig. 4-1. El planeta Mercurio. Fotografía realizada durante el viaje de la sonda Mariner 10.

La superficie de Mercurio se parece mucho a la de la Luna. Este planeta, al igual que los demás, está recubierto de una delgada capa de silicatos de color oscuro. No se han encontrado indicios de que exista agua. Como la Luna, tiene muchos cráteres, y es posible que sufriera un bombardeo tan prolongado como el de nuestro satélite. Todos los objetos del Sistema Solar debieron estar sometidos a los mismos flujos. En el caso de la Tierra sabemos que su densidad media es mayor que la del material de la superficie, de lo que se deduce que posee un núcleo de material relativamente pesado que está sometido a una gran presión. Mercurio, que es más pequeño y tiene una densidad media comparable a la de la Tierra (5,43 g/cm^3), ha de albergar

en su interior un «pesado» núcleo de mayor tamaño. Es probable que el planeta esté compuesto de hierro en un 60-70%. No se sabe si el núcleo es líquido En cualquier caso. Mercurio no tiene casi atmósfera, y es posible que no la haya tenido nunca.

Es sumamente probable que Mercurio esté «diferenciado», es decir, que se fundiera tras su formación Al enfriarse, el material fundido muestra el conocido efecto de la cristalización fraccionada. Se supone que el planeta vivió un período volcánico una vez finalizado el bombardeo de los meteoritos; es quizá por eso por lo que su superficie no está «plagada» de cráteres. Sin embargo, mientras no se disponga de mediciones sísmicas o de datos electromagnéticos no se puede asegurar nada sobre la estructura interna de Mercurio. De momento se sabe que el planeta está compuesto por materiales que condensan cerca de la temperatura del hierro metálico. La rotación cuasirresonante se debe, sin duda, al rozamiento de las mareas. Por lo demás, Mercurio no muestra indicios de tectónica.

Quién no conoce la estrella más brillante del firmamento, la estrella de la tarde, la estrella de la mañana: Venus (fig. 4-2). Al igual que en el caso de Mercurio, los griegos dieron dos nombres diferentes a este planeta: como estrella de la mañana Phospherus, y como estrella de la tarde Hesperus. La órbita de Venus es casi circular; su semieje mayor, el más próximo a la Tierra, mide 0,723 UA. y presenta una inclinación de 3,4 grados con respecto a la eclíptica. El período de revolución (sidéreo) alrededor del Sol es de 224,7 días y el de rotación de 243 días. La rotación es «retrógrada»: en un sistema de coordenadas centrado en el Sol, Venus se mueve «al revés» que los demás planetas (rotación «directa» en éstos, ya que se produce en el mismo sentido que el movimiento orbital: vistos longitudinales desde el norte ambos movimientos tienen lugar en sentido contrario al de las agujas del reloj). Los restantes datos astronómicos de Venus son muy parecidos a los de la Tierra. El eje de rotación tiene una posición casi vertical respecto al plano de la órbita (87°). De acuerdo con ello, el Sol sale por el oeste y se pone por el este: pero un «día» de Venus dura casi todo un «año». Desde hace más de 300 años se observa en la

cara no iluminada del planeta un débil resplandor variable, denominado «luz cenicienta», cuya naturaleza debe ser similar a la de la aurora boreal, pues su aparición coincide con tempestades magnéticas en la Tierra, lo que indica una causa solar común.

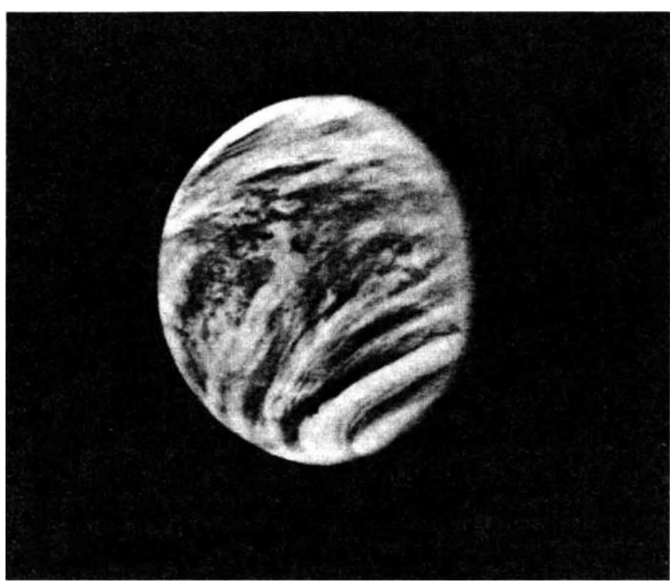


Fig. 4-2. El planeta Venus. Fotografía realizada desde la sonda Mariner 10.

El planeta está siempre cubierto de nubes, lo que ha impedido durante mucho tiempo conocer de cerca sus características. Esto sólo se ha conseguido cuando las sondas espaciales[6] han volado a su alrededor y, traspasando su cubierta de nubes,

---

[6] El primer vuelo en las proximidades de Venus lo realizó la sonda soviética Venera 1 en febrero de 1961 Le sucedió la sonda norteamericana Mariner 2, que el 14 de diciembre de 1962 pasó a 41.000 km del planeta. Venera 3 fue, el 1 de marzo de 1966, la primera sonda que penetró en la atmósfera de Venus El día 15 de diciembre de 1970 la sonda Venera 7 se posó por primera vez suavemente en la superficie.

han llegado a su superficie y cuando las técnicas de observación radioastronómica nos han proporcionado datos acerca de las capas más profundas, que permanecen ocultas a nuestra vista. La sonda Pioneer-Venus de la NASA ha reproducido durante su vida activa una gran parte (casi el 93%) de la superficie del planeta en «luz radar» (fig. 4-3). La Unión Soviética ha enviado en total ocho sondas Venera a Venus y Estados Unidos dos sondas Mariner (sondas espaciales estabilizadas en tres ejes) y dos Pioneer (de un solo eje) equipadas con 5 sondas de lanzamiento, vehículos de aterrizaje y estaciones orbitales.

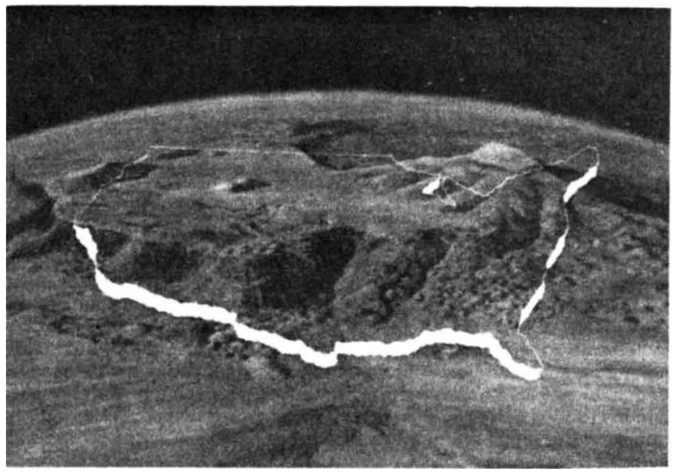


Fig. 4-3. Ishtar Terra: imagen de radar de la superficie de Venus. Dado que el planeta está siempre cubierto de nubes, la radiación electromagnética de onda corta (como la luz) no puede llegar a la superficie, aunque sí puedan hacerlo las radioondas de mayor longitud de onda del radar del Pioneer (1980). La imagen muestra una reconstrucción según las mediciones del radar. A título de comparación, se ha dibujado a escala el contorno de Estados Unidos.

La superficie de Venus resulta interesante porque es, en cierto modo, totalmente diferente de la de otros planetas. Ligeramente ondulada (±500 m) en amplias zonas (60% de la superficie), en ocasiones presenta grandes cadenas montañosas

que, naciendo en valles que se encuentran casi a 3 km por debajo de la superficie media, se elevan hasta alcanzar los 11 km de altura. El 16% de la superficie se halla por debajo de la altura de referencia y el 24% por encima, pero sólo el 8% se puede considerar realmente como alta montaña.

La corteza de Venus tiene mayor espesor que la de la Tierra, pero no tanto como las de la Luna o Marte; en cualquier caso, es lo suficientemente potente como para hacer imposible cualquier tectónica de placas. Dispersos por toda la superficie existen numerosos cráteres similares a los de Marte y la Luna, algunos de ellos con diámetros superiores a los 75 km. La zona montañosa del norte del planeta recibe el nombre de «Ishtar Terra» y cuenta con varias cadenas montañosas. El conjunto tiene aproximadamente la extensión de Australia. A la montaña más alta se le ha dado el nombre de «Maxwell Mons». Ocupa el extremo oriental de Ishtar Terra y tiene una altura de 11.800 m sobre el nivel de referencia. Esta zona parece ser una de las más accidentadas de todo el planeta. Según los datos proporcionados por el Pioneer, en la cara este del Maxwell Mons se abre un agujero circular de más de 1.000 m de profundidad, probablemente se trata de un cráter volcánico.

En las proximidades del ecuador se extiende una amplia zona montañosa, del tamaño de un continente, que recibe el nombre de «Aphrodite Terra». En esta región las montañas alcanzan «sólo» los 8.000 m de altura, pero no parecen existir volcanes. En total se han encontrado cuatro regiones montañosas (las dos restantes se denominan Alpha y Beta Regio), que no presentan particularidades importantes. Las sondas soviéticas Venera 9 y 10 se posaron en «Beta Regio» y, basándose en la radiactividad del suelo, encontraron indicios de estructuras basálticas (esto es, indicios de actividad volcánica).

En las grandes zonas onduladas, que ocupan el 60% de la superficie del planeta, se ha observado la existencia de grandes cráteres de unos 500 km de diámetro y entre 200 y 700 m de profundidad. La mayor parte de las zonas bajas se localiza al oeste de Ishtar Terra, a 70° de latitud norte. Su punto más bajo se halla a una altura inferior en unos 3.000 m a la de las regiones llanas. Desde el punto de vista geológico esta zona parece

ser más reciente y es posible que esté en parte rellena de lava basáltica. A partir de estas observaciones por radar se ha deducido que las llanuras medias de Venus presentan una gran similitud con los fondos marinos de la Tierra. Todas estas comparaciones indican que Venus, al igual que nuestro planeta, se solidificó en un período de evolución tectónica.

La densidad media de Venus es de 5,25 g/cm^3 y hace pensar en un núcleo muy rico en hierro. Se trata también de un planeta diferenciado, con una evidente semejanza con la Tierra. Sin embargo, y al igual que ocurre con Mercurio, sin disponer de datos sísmicos no se puede afirmar nada definitivo acerca de la estructura interna.

Para conseguir la «resonancia sinódica»[7] con la Tierra, el período de rotación de Venus debería ser de 243,16 días. Sin embargo, recientes mediciones realizadas por radar indican que el período actual es inferior al valor de la resonancia. Las mareas gravitacionales deberían poder prolongar el período de rotación hasta que fuera igual al de revolución orbital. En cualquier caso, las mareas atmosféricas inducidas térmicamente podrían ejercer un efecto contrario al de las mareas gravitacionales y estabilizar la resonancia sinódica.

Como es lógico, el tercer planeta, la Tierra (fig. 4-4), es el que mejor conocemos. Pero dado que algunas afirmaciones no se pueden hacer con total precisión, para comprender la física terrestre —la geofísica— es importante realizar observaciones en otros planetas con el fin de comprobar la validez de los datos. Por eso hablamos hoy de física de los planetas, porque al físico le interesa saber cómo se formaron y por qué son como son y no de otro modo. Sólo cuando se puedan explicar las causas precisas de todo ello será lícito afirmar que se ha comprendido la física de los planetas. Y hoy todavía estamos un poco lejos de ese momento.

---

[7] La llamada «rotación sinódica» hace referencia al tiempo entre dos determinadas posiciones consecutivas de dos planetas.

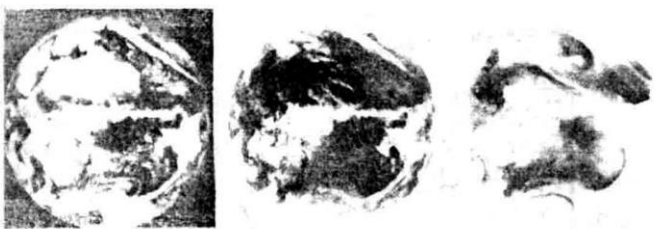


Fig. 4-4. La Tierra, fotografiada desde el satélite meteorológico europeo Meteosat, en tres zonas del espectro en el centro, en la luz visible; a la izquierda. 5-7 µm en la longitud de onda de la absorción del vapor de agua; a la derecha, en una longitud de onda entre 10,5 y 12,5 µm.

Nuestro planeta es un cuerpo en rotación achatado, un elipsoide de revolución cuyo achatamiento se debe a la rotación, que ha determinado la formación de un abombamiento (v. apéndice 6) en el ecuador. Se trata del tercer planeta más próximo al Sol y del único planeta del Sistema Solar en el que aparece agua en su superficie: el 70% de ésta se halla ocupada por los océanos. El resto lo ocupan los continentes, en una pequeña parte de los cuales vivimos nosotros, los hombres. A la superficie y a nuestro ámbito de vida les damos, por lo general, el nombre de biosfera. La corteza terrestre se denomina litosfera, y tiene tan sólo unos 30 km de espesor, profundidad en la cual cambian de pronto las características (discontinuidad de Mohoroviĉić). Por debajo se encuentra el «manto». La atmósfera —las partes gaseosas de la Tierra— está compuesta en un 78% de nitrógeno y en un 20% de oxígeno; el resto es vapor de agua, anhídrido carbónico y gases nobles.

En el interior de la Tierra encontramos, como sería de esperar en una esfera, una estructura por capas, de las que ya hemos mencionado la litosfera y el manto. El manto rodea al núcleo, en el que se distinguen un núcleo externo, líquido, y uno interno, sólido. La figura 4-5 muestra las dimensiones de las diferentes partes. En las figuras 9-4 y 9-5 se establece una comparación con la estructura interna de otros planetas. Sólo se tiene una información detallada acerca de la corteza. De las capas más profundas únicamente se conocen algunos aspectos

gracias a métodos indirectos de medición de los que nos ocuparemos en el capítulo 10.

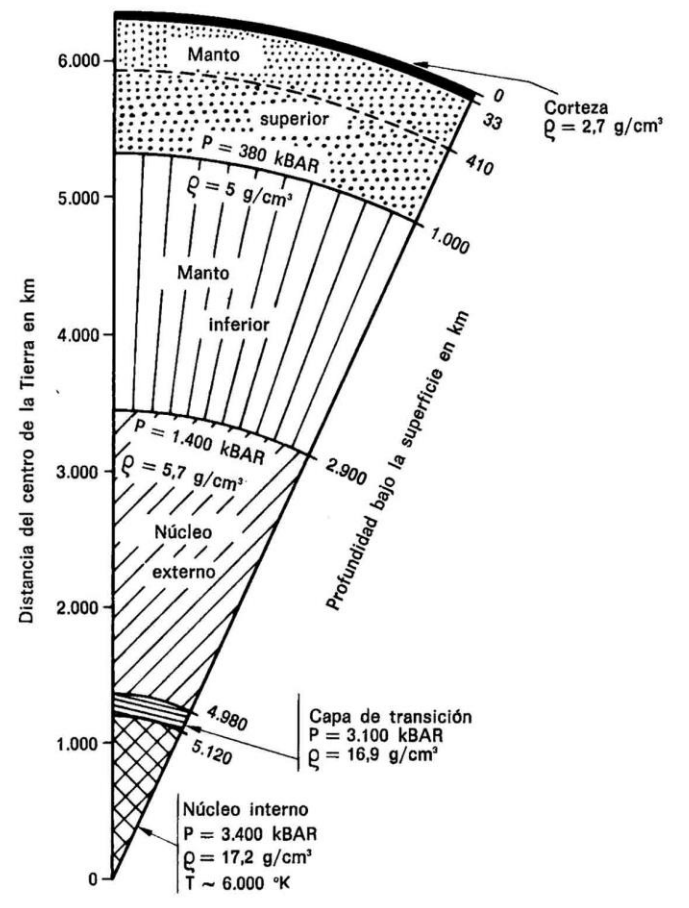


Fig. 4-5. Estructura del globo terrestre.

El núcleo interno de la Tierra tiene 1.250 km de radio. Lo recubre una capa de transición que, de 140 km de espesor, da paso al núcleo externo, que se extiende hasta los 3.486 km (0,55 radios de la Tierra). Éste se halla rodeado por el manto inferior, que posee unos 1.900 km de espesor; a continuación

se encuentra el manto superior, sobre el que reposa la corteza. Ésta, a su vez, forma bajo los continentes una capa de granito y gabro de ~33 km de espesor, mientras que bajo los océanos (donde falta la capa de granito) sólo mide 12 km. Sin embargo, hay una serie de variaciones regionales y locales: las fosas marinas, las dorsales oceánicas, las zonas de hundimiento tectónico continentales y las montañas.

Todas estas variadas manifestaciones están ligadas a fenómenos geofísicos acaecidos durante la evolución de la Tierra: vulcanismo, tectónica horizontal (deriva de los continentes) y vertical (formación de montañas), impacto de meteoritos. Como es lógico, tenemos que pensar que la Tierra, al igual que el resto de los planetas y la Luna, fue «perforada» a lo largo de su historia por los impactos de los meteoritos. Sin embargo, y a diferencia de los demás planetas, la erosión del agua y del viento ha modelado continuamente su superficie. En el caso de la Luna, por ejemplo, a partir de la correlación existente entre el número de cráteres y el momento de formación de la superficie afectada (edad de las rocas), se ha podido determinar la evolución de la superficie a lo largo del tiempo y compararla con la de otros planetas (Mercurio, Marte). Esto ya no se puede realizar en el caso de la Tierra, y son muchos los datos que tenemos sobre su evolución que proceden del conocimiento de otros planetas.

Más allá de la órbita terrestre encontramos el planeta Marte (lámina 1), fácil de reconocer por su aspecto rojizo. Su atmósfera (compuesta principalmente de anhídrido carbónico) es transparente, lo que nos permite ver la superficie. Las regiones medias presentan una tonalidad amarillenta; probablemente se trate de zonas desérticas. En la superficie no hay agua y es probable que el color amarillo rojizo del planeta se deba al óxido de hierro. La superficie de Marte es muy fría (150ºK por la noche y 250°K durante el día) y seca.

Marte tiene un período de rotación similar al de la Tierra: 24 horas. 37 minutos. Una vuelta alrededor del Sol dura 687 días (año de Marte) Posee dos lunas: Deimos y Phobos. En la famosa obra de Jonathan Swift (1667-1745) *Los viajes de Gulliver* ya se encuentran sorprendentes referencias a la existencia

de dos lunas en Marte: Gulliver visita la isla de Laputa, cuyos habitantes se interesan por la astronomía. Han descubierto, según pone Swift en boca de Gulliver, dos satélites de Marte. ¿Cómo es ello posible? La historia se remonta a Kepler, quien tras el descubrimiento de las cuatro lunas de Júpiter por Galileo pensó: la Tierra tiene una, Júpiter cuatro; entonces Marte ha de tener dos. Saturno ocho, etc. En relación con Phobos el astrofísico ruso J. S. Shklovsky expresó en 1960 la sospecha de que se trataba de un satélite artificial. Para ello se basó en la inexplicablemente irregular órbita de esta luna. Phobos se mueve alrededor de Marte cerca de la «órbita de Roche»[8]. Es probable que en el campo de gravedad pierda polvo debido a este efecto y que este polvo le frene en cierta medida.

Dado que con un telescopio puede verse desde la Tierra la superficie de Marte, aun cuando no se distingan muchos detalles —a excepción de los «canales de Marte», descubiertos en 1888 por el astrónomo italiano Schiaparelli—, este planeta ha sido durante mucho tiempo objeto de múltiples especulaciones. G. V. Schiaparelli denominó a la estructura descubierta «canali», lo que significa ranuras, estrías. Sin embargo, en muchos idiomas se tradujo el término por «canales», con un significado que no corresponde a la idea original de Schiaparelli. De este modo surgió la leyenda de los «canales de Marte». El astrónomo Percival Lowell dedicó parte de su vida a demostrar que los canales eran obra de los marcianos (escribió tres libros sobre este tema; A. R. Wallace publicó una obra a modo de réplica). En 1892 y 1909 se publicaron las obras de Flammarion,

---

[8] Cuando una luna se mueve en el campo gravitacional de un planeta de acuerdo, por ejemplo, con la ley de la gravitación (cap. 2), las partes de la luna que miran hacia el planeta serán más atraídas que las que no lo hacen, así pues, las partes de la luna tienden a separarse. Pero al mismo tiempo se atraen Por ello existe cierta distancia de un planeta, la llamada «órbita de Roche» (recibe el nombre del matemático francés Edouard Roche), en la que la diferente fuerza de atracción de las partes de la luna es igual a la diferencia de fuerza que el planeta crea en ella: fuera de esta órbita predomina la cohesión, dentro de ella la luna se separa en dos.

que no se diferenciaban mucho de las anteriores. El último libro de este tipo vio la luz en 1963 en México. Los marcianos habían cobrado tal vida en la fantasía de los hombres que el propio Carl Friedrich Gauss, el famoso matemático de Gotinga. propuso el envío de señales a comienzos del siglo pasado Su propuesta consistía en que había que preparar en la tundra siberiana tres gigantescos cuadrados rodeados de pinos y sembrar las superficies con trigo o con una hierba adecuada, de modo que de ellos se pudiera deducir el teorema de Pitágoras. En su opinión, los marcianos, una vez que hubieran comprendido el mensaje, podrían enviamos señales reflejando la luz solar hacia nosotros, pues Marte se encontraba fuera de la órbita terrestre, por lo que resultaba fácil...

En 1964 despegó rumbo a Marte la sonda norteamericana Mariner 4, y en 1971/72 la Mariner 9. Con ello se acabaron todas las especulaciones, con una sola excepción: ¿existe o ha existido vida en Marte? Según sabemos desde que la sonda Mariner 4 sobrevolara el planeta el 14 de julio de 1965, la superficie presenta un gran número de cráteres (más de 10.000), igual que la Luna o Mercurio. Nadie esperaba tal cosa. Además. Marte apenas tiene campo magnético La sonda Mariner 4 sobrevoló también la cara no iluminada del planeta De este modo pudieron recibirse las señales de la sonda después de que traspasaran la atmósfera de Marte. Esto permitió conocer la presión atmosférica en la superficie: ¡150 veces inferior a la de la Tierra!

En 1969 las sondas Mariner 6 y 7, que pasaron a «sólo» 3.500 km de Marte, repitieron y mejoraron las mediciones. Luego se concibió el programa «Viking» (en el que la NASA invirtió casi dos mil millones de dólares). Este programa, que ha tenido gran éxito, ha proporcionado una increíble cantidad de información. Desde entonces es Marte el planeta que mejor conocemos, aparte, naturalmente, de la Tierra.

Marte es un planeta muy variado desde el punto de vista geológico. Tiene dos hemisferios morfológicamente diferentes, con llanuras en el norte y un terreno cubierto de cráteres en el sur. Ambas regiones quedan separadas por un círculo má-

ximo inclinado 35° con respecto al ecuador. Junto a las regiones polares cubiertas de hielo, las grandes montañas (unos 20 escudos volcánicos) constituyen los paisajes más impresionantes. El mayor de estos volcanes es el Olympus Mons. cuya estructura recuerda a la del volcán hawaiano Mauna Kea, pero cuya cima alcanza la gran altura de 27 km sobre el nivel de referencia de Marte. Su diámetro, de 550 km, no es menos impresionante. En las fotografías realizadas durante el programa Viking se aprecian perfectamente los ríos de lava. En las sucesivas erupciones, la lava ha debido ir formando capas concéntricas que rodean al volcán. La superficie cubierta de lava tiene varios millones de kilómetros cuadrados y en ella no hay ningún cráter. Pero en Marte existen otros muchos volcanes, aunque sólo se haya dado nombre a los más grandes. Es posible que el planeta tenga incluso volcanes activos. En la gran cantidad de fotografías de que se dispone en la actualidad se aprecia que el volcanismo ha tenido una gran importancia en la evolución geológica de la Luna. Por consiguiente, si se comparan la superficie de Marte y la de nuestro satélite se puede deducir algo —con gran imprecisión, naturalmente— acerca de la edad de los cráteres a partir del número de éstos existentes en la lava. Según este método, los volcanes de las zonas del sur tendrían más de 3.500 millones de años. Otras zonas, en cambio —como la caldera del volcán Asia Mons— presentan menor número de cráteres, lo que hace pensar que se remontan a menos de 300 millones de años. Se argumenta que la lava cubre sólo los cráteres más antiguos, por lo que únicamente son visibles aquellos que se han formado tras la última erupción volcánica. En las imágenes enviadas por los Viking a la Tierra, en cinco de los grandes volcanes se observan estructuras radiales, de color oscuro, que los vientos modifican con gran rapidez, pero que en ocasiones vuelven a formarse de nuevo. Se ha querido ver en este hecho una prueba de la existencia de volcanismo activo en Marte, tanto más habida cuenta de que estas estructuras no se aprecian en otras grandes montañas.

Otro fenómeno interesante es la región de Tharsis, de la cual 2,6 millones de kilómetros cuadrados se encuentran a unos

9 km de altura sobre el nivel de referencia. Esto se puede considerar como la prueba de la existencia de un importante movimiento tectónico que posiblemente se iniciara hace 4.000 millones de años. En cambio, Helias Planitia, el mayor valle circular, está a más de 6 km por debajo del nivel de referencia, en la zona alta del hemisferio sur, profusamente cubierta de cráteres. A pesar de todo ello, más del 40% de la superficie de Marte se puede considerar como llanura.

Otra estructura de la superficie son los ya mencionados «canales». Su aspecto es el de valles surgidos por la acción de cursos de agua. Pero como en la actualidad no se detecta agua —y no existe ningún otro líquido—, se ha pensado que podrían estar relacionados con capas de permafrost, esto es, de hielo bajo la superficie. Los «canales» se habrían formado en momentos en los que en Marte reinaba un clima totalmente diferente al actual, sobre todo más cálido, lo que permitía la existencia de cursos de agua.

Los vientos también han provocado cambios importantes en la superficie de Marte a lo largo de los tiempos geológicos. En la actualidad se producen todavía tempestades de polvo o arena. En 1971 el Mariner 9 entró en órbita alrededor de Marte y las sondas soviéticas Mars 2 y 3 lanzaron sondas de medición Mientras las sondas se acercaban se desató una fuerte tempestad de polvo que prácticamente impedía ver la superficie del planeta. La sonda que se posó trabajó sólo durante 20 seg; probablemente la volcó el viento.

Los casquetes de hielo de los polos de Marte se componen, probablemente, de anhídrido carbónico congelado y agua, dominando el primero. Las temperaturas de esas superficies oscilan en invierno en tomo a los 150° K. Es probable que el CO_2 se sublime a mayor temperatura, pues uno de los Viking registró en verano una temperatura de 205ºK. con lo que hay que destacar definitivamente que el hielo de anhídrido carbónico pudiera estar en contacto directo con la atmósfera.

Tal y como se puede apreciar en muchas imágenes, la superficie de Marte está cubierta de rocas (lámina 2). Durante el programa Viking, a través de la fluorescencia de rayos X se analizó la composición química del suelo, lo que permitió sacar

algunas conclusiones sobre los minerales existentes. Así, se comprobó que el material está compuesto de un 45% de óxido de silicio y en un 19% de óxido de hierro (Fe_2O_3). Además, se encontraron magnesio, calcio, azufre, aluminio, cloro y titanio, resultando sorprendentemente alta la proporción de azufre: más de cien veces superior a la de la Tierra.

La proporción de hierro con respecto al silicio es más baja que, por ejemplo, en los condritos, material rico en carbono que se encuentra a menudo en los meteoritos (v. cap. 7) y que se considera como parte del material primitivo del Sistema Solar; sin embargo, esta proporción se mantiene más alta que en la mayoría de los materiales más diferenciados, y entre ellos también los de la Tierra. Como es lógico, estos datos proceden sólo de los dos puntos donde se posaron los Viking-Lander y se ignora cuál es su grado de representatividad. A pesar de ello, el conjunto de todos los demás datos obtenidos nos permite llegar a la conclusión de que sí tienen un carácter «medio», esto es, sí son representativos.

Otra de las misiones de los Viking-Lander consistió en realizar mediciones sísmicas en Marte, sin embargo, sólo un instrumento (el Viking II) trabajó sin problemas entre el 4 de septiembre de 1976 y el 2 de abril de 1978. El Viking II se posó en Utopia Planitia De los 20 meses analizados sólo 3 fueron realmente «tranquilos». Los datos sísmicos de Marte son, en general, similares a los de la Tierra, lo que indica que en la corteza hay también agua (que amortigua las ondas sísmicas); también se probó la existencia de agua en la atmósfera. Sobre la estructura interna hoy sabemos que a 15 km de profundidad parece haber una zona de cambio brusco bajo la cual se encuentra la litosfera, de 200-300 km de espesor. La densidad media de 3,933 g/cm^3, el momento de inercia, el campo de gravitación (que presenta varias anomalías) y las observaciones realizadas en la superficie nos llevan a la conclusión de que la diferenciación del planeta ha tenido que conducir a la formación de una «corteza», un «manto» y un núcleo rico en hierro (hierro o sulfuro de hierro) de 1.300-2.000 km de radio. De la gran altura de los volcanes se puede deducir también que la corteza presenta un gran espesor. El manto debe ser más frío y más espeso

que el de la Tierra. La última fuente importante de información sobre el interior de Marte, el campo magnético, no se puede valorar de un modo unívoco debido a la variabilidad de los campos exteriores (campo magnético interplanetario. corrientes inducidas, etc.). Por ello, no es posible asegurar que el núcleo sea líquido (tal circunstancia debería producirse si el planeta tuviera un campo magnético dinámico). La densidad media es bastante inferior a la de la Tierra y esto significa o bien que Marte contiene menos hierro que nuestro planeta o bien que el hierro ha pasado a óxido de hierro (o ambas cosas a la vez). Todos estos problemas han obligado a revisar los antiguos modelos sobre la estructura de Marte.

V. LA TIERRA: EL SOL, EL HOMBRE Y EL CLIMA

El Sol envía tal cantidad de energía a los planetas interiores que sus atmósferas, cuando existen, se ven muy influidas por él; en los planetas exteriores, en cambio, pueden dominar fuentes de energía internas (como Júpiter). Por ello vamos a hablar ahora de la variabilidad de algunos fenómenos en el Sol y de su influencia sobre el clima de la Tierra, con la consiguiente peculiaridad de la atmósfera terrestre desde que ésta existe. Aunque otro tanto se podría decir en los casos de Venus o Marte, no disponemos de una serie de observaciones que nos permita hacer las mismas afirmaciones.

Se denomina clima a un conjunto de características de la atmósfera durante un largo período de tiempo, definido por los datos recogidos a lo largo de muchos años. Disponemos de datos climáticos de los últimos 20.000 años: a partir del siglo XVII se realizaron observaciones con instrumentos; el resto está constituido por informaciones indirectas sobre temperatura, precipitaciones, vientos, etc.

El clima de nuestro planeta no ha sido siempre el mismo. Cabe suponer que los dos polos han estado libres de hielo durante más del 90% del tiempo transcurrido desde el origen de la vida. En este tiempo se han experimentado al menos cuatro, quizás incluso seis, períodos de hielo en las latitudes medias (hasta 38°). Por consiguiente, el clima de la Tierra ha variado mucho, oscilando entre períodos fríos y períodos cálidos. Pero entre uno y otro extremo transcurren muchos miles de años, por lo que tales cambios carecen de importancia para los hombres actuales. Los cambios climáticos se reflejan en una redistribución del calor y el agua sobre el globo. ¿Cuál es la causa de tales cambios?

Para dar una respuesta hay que hablar de la constancia de la fuerza luminosa del Sol. Con objeto de analizarla se han

puesto en marcha recientemente algunos programas. Los primeros resultados, obtenidos con métodos radiométricos desde las naves espaciales, han demostrado que en 1978 el conjunto de la radiación solar era un 0,4% mayor que en 1976.

Hasta hace algunos años se pensaba que la variabilidad del Sol, manifestada en los ciclos de 11 o 22 años de las manchas solares (fig. 3-3), era un fenómeno totalmente regular. Pero esta idea ha entrado en crisis desde que el astrónomo norteamericano John A. Eddy comenzó a estudiar el pasado «histórico» del Sol, remontándose a los últimos milenios, en los que los hombres han observado el Sol y han dejado de algún modo constancia de sus observaciones.

Todos sabemos que el Sol influye sobre nuestro clima. Así, si cambia la emisión de energía por parte del Sol, cambia también nuestro clima. La simple oscilación de la temperatura media de una región en tan sólo 1ºC en la media anual repercute de un modo visible, por ejemplo, en las reservas de agua, en la vegetación, etc. Una alteración de la radiación solar podría hacer que las temperaturas medias se alteraran en varios grados, lo que a su vez significaría una nueva glaciación o el deshielo de los casquetes polares. No sabemos cuál fue la causa de las glaciaciones. Tampoco sabemos si el ciclo solar de 11 años tiene algún efecto sobre nuestro clima. Aunque hay una serie de indicios que hacen pensar que existe una relación, no se dispone de ningún tipo de prueba estadística.

En el intento de descubrir tales relaciones se han desarrollado en los últimos años distintos métodos que permiten buscar al menos alguna conexión en el pasado. Uno de los principales es el «método del carbono 14». El carbono (C) de número másico 14 es un isótopo poco frecuente del carbono ordinario de número másico 12. En el apéndice 7 se describe este método. Para estudiar la historia más reciente de la Tierra resulta muy adecuada la dendrocronología. El ^{14}C se produce en la atmósfera. Las plantas toman CO_2 en el curso del proceso de la fotosíntesis, y de esta manera los árboles absorben ^{14}C durante su crecimiento anual. Dado que el crecimiento en grosor se realiza por capas, analizando la proporción de ^{14}C y ^{12}C en los diferentes anillos es posible conocer las oscilaciones anuales

del contenido de ^{14}C de la atmósfera. Esto refleja también directamente la tasa de producción. Bajo unas mismas condiciones geomagnéticas se conocería la variación de la actividad solar. Pero no hay que olvidar que se pueden producir alteraciones si el campo magnético de la Tierra cambia o incluso se invierte, lo que, tal y como sabemos, ha ocurrido ya en el pasado. No es preciso limitarse a los árboles que fueron cortados estando vivos. El método del carbono 14 se puede aplicar también a restos de árboles (incluso fosilizados). Con este método se han realizado dataciones hasta el 5000 a.C. Pero al interpretar las mediciones hay que tener en cuenta la diferencia de tiempo existente entre la producción de ^{14}C en la atmósfera, el transporte de este ^{14}C hasta la biosfera y su incorporación al CO_2, 20 años aproximadamente. Este retraso «oculta» al mismo tiempo las oscilaciones que se producen en períodos de tiempo cortos, como el ciclo de los 11 años, y traslada en el tiempo importantes modificaciones en la producción de ^{14}C.

Un grupo de científicos norteamericanos recogió y elaboró hace algunos años todos los datos obtenidos por medio del método del carbono 14. En la figura 5-1 se ha representado el incremento de la producción de ^{14}C en sentido positivo hacia abajo, de modo que el cambio de sentido coincide con el aumento de la actividad solar, representado hacia arriba. Se ha trazado una sinusoide (curva plana) ajustada a los datos observados. Esta curva abarca un período de 10.000 años, lo que coincide perfectamente con el período de cambios en el momento magnético de la Tierra conocido a través de las mediciones paleomagnéticas[9]. El momento dipolar magnético de la Tierra alcanzó un máximo hacia el año 200 d.C.

Pero en la figura se aprecian muchas más cosas. Empecemos por la derecha, esto es, por la era moderna. El importante descenso de la concentración de ^{14}C al final de la figura se denomina «efecto Suess»: la industrialización trajo consigo un

[9] Paleomagnetismo: mediciones del magnetismo en las rocas; en especial, determinación de la dirección del campo magnético de la Tierra.

fuerte aumento de la combustión de carbón, con lo que se aumentó dramáticamente el contenido de CO_2 en la atmósfera. Con ello descendió la proporción relativa de ^{14}C en el CO_2 ahora existente. En los últimos tiempos se ha acentuado aún más este proceso, de modo que en la actualidad el ciclo solar ya no influye en la materia que se forma en lo que a la proporción de ^{14}C se refiere.

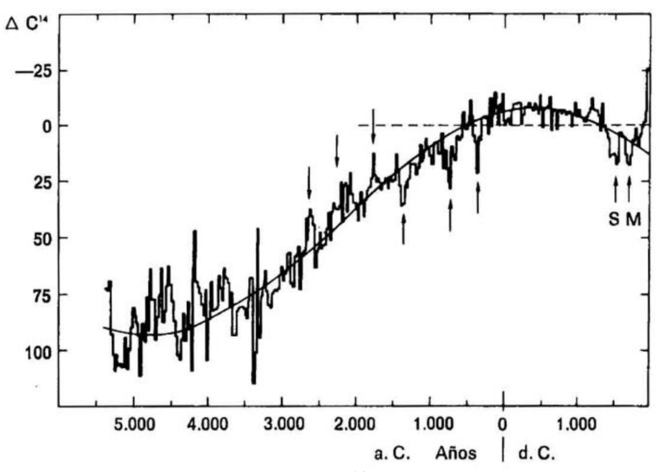


Fig. 5-1. Variaciones del contenido de ^{14}C isótopo del carbono, en diversos materiales en el pasado (el aumento se representa hacia abajo). El fuerte descenso registrado a la derecha de la figura representa la revolución industrial del siglo XIX, con el comienzo de una espectacular combustión de carbono. Los períodos señalados con S y M son los mínimos de Sporer y Maunder, respectivamente.

Si avanzamos hacia atrás en el tiempo nos encontramos con dos importantes períodos designados con las letras «S» y «M», que coinciden con momentos de baja actividad solar. Aparece en primer lugar el «mínimo de Maunder» (M). Este período (1645-1715), descrito por el astrónomo inglés E. W. Maunder como un «período de mínimo prolongado», constituye en opinión de John A. Eddy un importante y extraordinario acontecimiento en la relación Tierra-Sol. Recogiendo de un modo sistemático las más diversas observaciones relacionadas con la

actividad solar (observación de las manchas solares, de la aurora boreal, registros geomagnéticos, observación de la corona solar durante los eclipses de Sol), este astrónomo ha podido constatar que durante estos 70 años (!) apenas se apreció la existencia de manchas solares.

Una valiosa fuente histórica es la constituida por las observaciones de la actividad solar realizadas en China durante 4.000 años que, sin embargo, no han sido explotadas hasta los últimos tiempos. El astrónomo chino Chu recogió 916 observaciones de eclipses solares, entre el 2137 a.C. y el 1785 d.C. Los astrónomos chinos registraron los eclipses de Sol, fenómenos en virtud de los cuales podían comprobar la exactitud del calendario Describieron estos eclipses con palabras tan poéticas como «cuando el Sol y la Luna no querían convivir pacíficamente en el firmamento...». Un astrónomo de la corte imperial murió decapitado por no haber previsto el eclipse de Sol del año 2137 a.C. En relación con la materia que nos ocupa resulta muy interesante la forma de la corona solar durante los eclipses, no en vano varía totalmente en los mínimos y los máximos de manchas solares, tal como se aprecia en la figura 3-4. Recogiendo sistemáticamente tales observaciones se pueden conocer períodos anteriores a 1600: así, es posible saber si en aquellos tiempos se produjo un ciclo de actividad solar similar al actual. El resultado, el número relativo de manchas solares, aparece representado en la figura 3-3 y ha sido prolongado hasta el año 1600. El ciclo de 11 años no se observó entre 1650 y 1700. A partir de 1700, y con mayor seguridad a partir de 1750, sí se dispone de pruebas de la existencia del ciclo. De los tiempos anteriores nada sabemos, ni siquiera si existió realmente este ciclo. Probablemente Galileo tuvo mucha suerte al observar el Sol en 1611 con su telescopio, pues unos años más tarde no habría podido ver las manchas

El período señalado en la figura 5-1 con «S», el mínimo de Sporer en el siglo XV (1400-1510), fue muy similar al mínimo de Maunder. Como es lógico, la reconstrucción resulta más difícil en este caso, pese a lo cual existen suficientes pruebas que no dejan lugar a duda, se trata de otro período en el que prácticamente no se observaron manchas solares. Los mínimos en la

producción de ^{14}C permiten deducir la existencia de períodos de actividad solar muy elevada: así, por ejemplo, disponemos de relatos que hacen referencia a una importante actividad de la aurora boreal hacia el año 1200. Si nos remontamos más atrás en el tiempo nos encontramos con el mínimo de los años 640-710, el «máximo romano» del 20 a.C. al 80 d.C., el «mínimo griego» del 440 al 360 a.C., el «mínimo homérico» en torno al 700 a.C., el «mínimo egipcio» en torno al 1300 a.C. y el «mínimo sumerio» en tomo al año 2700 a.C. Las grandes desviaciones con respecto a la situación media en estos primeros años son en parte oscilaciones estadísticas: el momento magnético de la Tierra pasó por un mínimo, de modo que la influencia del Sol sobre la atmósfera y la producción de ^{14}C fueron mayores que en la actualidad. Se puede decir que no existe ningún indicio de un comportamiento periódico del Sol.

Eddy ha planteado recientemente otra importante cuestión. Ha recogido todas las observaciones relacionadas de algún modo con el diámetro del Sol —de Christof Scheiner (en tomo a 1630) y Johannes Hevelius (en torno a 1647), fundamentalmente— y ha llegado a la conclusión de que el Sol se contrae 2 seg de arco por año. Con objeto de probar esta tesis, Irwin Shapiro ha estudiado los pasos de Mercurio por delante del Sol, para lo que ha contado con observaciones realizadas desde 1750 hasta la actualidad El resultado es que el diámetro solar ha podido variar a lo sumo 0,3 seg de arco por año. De cualquier modo, existe otra hipótesis que parece más plausible: es la que sugiere que estos cambios son periódicos. Este hecho se podría relacionar con una serie de referencias recientemente publicadas a una modificación de la velocidad de rotación del Sol. Puede suponerse que existe una relación entre la actividad solar y la velocidad de rotación, una hipótesis teóricamente aceptable, pues la inestabilidad convectiva en la zona de convección, situada bajo la fotosfera, se contrarresta con una velocidad de rotación creciente. Según el astrónomo Eddy, en la primera mitad del siglo XVII aumentó continuamente la velocidad de rotación, hasta que en el mínimo de Maunder no se pudieron formar manchas. La velocidad de rotación es hoy

muy inferior a la establecida para el siglo XVII a partir de observaciones de aquellos tiempos.

Hay que destacar el hecho de que existe un paralelismo temporal entre el mínimo de Maunder, el mínimo de Sporer, el máximo medieval y los cambios climáticos. Los períodos en los que disminuye la actividad solar coinciden con aquellos en los que desciende la temperatura media en la Tierra (durante la «pequeña edad del hielo» la temperatura media descendió casi un grado por debajo de la media anual). Del mismo modo, el máximo parece coincidir también con una «época cálida». El avance y el retroceso de los glaciares podrían estar relacionados con cambios bruscos de la actividad solar.

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos realizados, no se ha encontrado todavía ningún mecanismo con cuya ayuda se pueda probar la influencia directa de la variación de la actividad solar sobre el clima. La intensidad de la radiación electromagnética del Sol es, por término medio, constante y no refleja la variación del número relativo de manchas solares. Eddy ha planteado que tales efectos podrían producirse a través de una modificación de la constante solar.

Esta idea resulta muy interesante. La reacción termonuclear que se produce en el interior del Sol, y en la que el hidrógeno se transforma en helio, transcurre en dos etapas. En un primer paso, dos protones se unen formando un deuterón. Dicho de un modo más exacto, de un protón se forma un neutrón con la emisión simultánea de un electrón con carga positiva (positrón) y un neutrino; el protón y el neutrón constituyen juntos un núcleo de deuterio estable (D. ^{2}H). En pasos sucesivos se forma helio a partir del deuterio, pero no se libera ya ningún neutrino. Un neutrino (partícula así denominada por el físico norteamericano Enrico Fermi) no tiene ni carga ni masa que se pueda medir, como un fotón. El neutrino casi no reacciona con la materia y por ello resulta muy difícil comprobar su existencia. Pero, por otro lado, esto mismo le permite infiltrar las estrellas. En la Tierra se debería poder comprobar, por ello, la existencia de neutrinos procedentes del «homo de fusión nuclear» del Sol. Tienen mucha energía porque surgen de la energía de transfor-

mación del protón (la energía térmica del Sol procede de la liberada en la formación de deuterio y helio). Un gigantesco centellómetro situado 1.500 m bajo la superficie de una mina de sal abandonada en Estados Unidos permite identificarlos. En esta instalación, llena de C_2Cl_4, se mide el centelleo producido por la reacción de un núcleo de cloro de número másico 37 con un neutrino, transformándose el núcleo de cloro en un núcleo de argón de igual número másico. Pero sólo se ha detectado la tercera parte de la cantidad de neutrinos procedentes del Sol que se esperaba encontrar.

Este punto es sumamente interesante Podría ser tal y como se describe Pero también se presentan otras posibles explicaciones totalmente diferentes: quizá se transformen algunos neutrinos en antineutrinos, en su antipartícula (como se plantea en la actualidad en la «gran teoría de la fusión» de la física de las partículas elementales): quizá los neutrinos tengan una masa limitada (como parecen demostrar algunos trabajos soviéticos) La imposibilidad de explicar el flujo de neutrinos solares podría también abrir una puerta que permitiera avanzar en la comprensión de la teoría de las partículas elementales.

¿Cómo hay que interpretar esto? ¿Se interrumpe a intervalos la producción de energía en el Sol? ¿Qué falla en las ideas acerca de la producción de energía solar? Una sencilla solución a este dilema es la hipótesis que sostiene que la producción de energía termonuclear en el interior del Sol es menor de lo que se pensaba hasta ahora y que el Sol se contrae según una determinada constante temporal, de modo que una parte de la energía solar (un pequeño porcentaje) procede de la contracción gravitacional. Esto podría llevar a un complejo estado de equilibrio. Según esta explicación el Sol se contrae y luego se dilata por el aumento de la presión de radiación, con lo que se enfría y se contrae de nuevo, Por consiguiente, tal como supuso Eddy, se trata de cambios periódicos superpuestos a la emisión constante de energía. Sea como fuere, se sospecha que los fenómenos que observamos son sólo manifestaciones secundarias de procesos más importantes que transcurren en el interior del Sol y de los que no sabemos lo suficiente como para describirlos con detalle.

Si bien nada conocemos con seguridad acerca de la influencia del Sol sobre nuestro clima, sí contamos con un buen número de datos acerca de la influencia que sobre éste ejerce el *hombre.* Se han talado bosques para ganar superficie cultivable. Esto ha determinado un aumento de la velocidad del viento en la superficie de la Tierra, cambios en la temperatura y la humedad del aire en las capas bajas de la atmósfera y modificaciones en el régimen de humedad del suelo y evaporación. Otra consecuencia de la actividad humana es la irrigación artificial, que en algunas zonas se utiliza desde hace siglos. El correspondiente aumento de la evaporación ha provocado descensos regionales de la temperatura y un incremento de la humedad relativa.

En los últimos tiempos se está confirmando la sospecha de que el hombre puede influir sobre el clima de un modo totalmente diferente. Año tras año se queman miles de millones de toneladas de carbón y petróleo, que pasan a la atmósfera en forma de anhídrido carbónico (CO_2). Si el CO_2 se quedara en la atmósfera, aumentaría gravemente su concentración. Por fortuna, esto no resulta tan dramático: el continuo intercambio de CO_2 entre la atmósfera *y* los océanos hace que una gran parte se disuelva en el agua (19 mol/m^2/año) y que en la atmósfera sólo permanezca una fracción del CO_2 antropógeno. A pesar de todo, la proporción de CO_2 en la atmósfera ha aumentado en un 10-15% en el último siglo. En la actualidad, el contenido de CO_2 crece con un ritmo de un 0,2% por año. Así pues, los océanos se comportan como reguladores de la producción de CO_2, y siempre han actuado como tales. Pero la producción de CO_2 es superior a la velocidad con la que los carbonatos se sedimentan en el fondo marino, esto es, a la velocidad con la que el CO_2 se retira del agua. Se estima que los océanos contienen cincuenta veces más CO_2 que la atmósfera. Esto tiene un efecto desestabilizador sobre el clima. Cuando el agua se calienta, cede CO_2 a la atmósfera. Al mismo tiempo, se evapora más agua. Tanto ésta como el anhídrido carbónico aumentan el efecto de invernadero de la atmósfera (v. más adelante), con lo que los océanos se calientan, etc. Sólo el incremento de la nubosidad regula este efecto al reducir la llegada de radiación.

La paleoclimatología estudia el clima de la Tierra en el pasado lejano. Aunque esta disciplina surgió hace más de cien años, recientemente se han producido grandes avances gracias a los nuevos métodos de investigación. En los últimos cinco años se ha dado a conocer una «historia» bastante satisfactoria de los cambios climáticos acaecidos en los últimos 18.000 años (desde la última glaciación): la temperatura en la superficie terrestre, la distribución de las grandes masas de hielo, el albedo de la superficie de la Tierra. Gracias a estos parámetros se han elaborado modelos climáticos con cuya ayuda ha sido posible conocer detalles meteorológicos (p. ej., el tiempo). Los análisis del suelo realizados en diversos puntos de Europa demuestran que en los últimos dos millones de años se han producido 17 ciclos interglaciales. Las glaciaciones comenzaron hace dos millones y medio de años. Otros datos sobre el clima se obtienen, por ejemplo, a través del estudio de los anillos de crecimiento de los troncos de los árboles mediante los métodos de los isótopos radiactivos (los anillos más gruesos corresponden a años cálidos y húmedos), a través del estudio del polen recogido en los sedimentos, del estudio de las turberas, del plancton marino, etc.

La paleoatmósfera —esto es, la atmósfera que se formó tras el enfriamiento de la Tierra— estaba formada por agua, anhídrido carbónico y nitrógeno molecular. Los procesos biológicos (fotosíntesis, metabolismo) añadieron con posterioridad oxígeno, amoniaco, metano y otros gases. La principal fuente de oxígeno fue la fotolisis del agua y el anhídrido carbónico (esto es, la descomposición de las moléculas en átomos bajo la acción de la luz). Pero el contenido en oxígeno aumentó drásticamente como consecuencia de la fotosíntesis, es decir, de la aparición de la vida. El mismo proceso determinó la formación de ozono. En este sentido hay que destacar que en aquellos primeros tiempos la superficie terrestre estaba expuesta a la radiación ultravioleta del Sol, de la que no se vio protegida hasta la formación de ozono.

La climatología ha avanzado mucho en los últimos años debido a que las graves alteraciones producidas han llevado a poner más recursos a su disposición, que se cuenta con métodos

de investigación que permiten abordar problemas más complejos y a que los modernos ordenadores hacen posible un mayor rendimiento. Todo ello nos permite estudiar mejor el clima.

Al hablar del clima hay que hacer también al menos una breve mención al tiempo, que es un factor que experimentamos directamente. Pero nos vamos a limitar a hablar de la previsión o pronóstico del tiempo. Hay una serie de refranes populares cuyo pronóstico del tiempo, sin estar basado en unos conocimientos específicos, se cumple en un número importante de casos. A los meteorólogos el trabajo no les resulta fácil, pues el aumento de la probabilidad de acierto en el pronóstico va ligado a una inversión considerable. Existen fundamentalmente dos formas de pronosticar el tiempo: lo ideal sería conocer lo suficientemente bien el sistema climático con todos sus mecanismos, hasta el punto de poder elaborar un modelo físico, determinista, que refleje las principales características de los climas regionales y permita hacer pronósticos, correctos en el tiempo y en el espacio, de acontecimientos climáticos futuros. Todavía no existen tales modelos. Se trabaja con instrumentos más sencillos que, aunque cuentan con un 50% de probabilidad de acierto, en las previsiones para dos días aciertan en un 75% de las ocasiones en el mejor de los casos. La probabilidad de acierto es mayor en los pronósticos para espacios de tiempo más cortos, disminuyendo a medida que se alargan tales espacios.

El segundo método para pronosticar el tiempo es estadístico. Hace mucho que se aplicó la estadística a la evolución del tiempo, lo que permite asignar probabilidades a determinados procesos. La figura 5-2 muestra un mapa del tiempo previsto y otro del tiempo observado. Se representan las temperaturas y precipitaciones del verano de 1979. Las iniciales significan lo siguiente: B = por debajo de lo normal, N = normal, A = por encima de lo normal, L = ligeras, M = moderadas, H = fuertes. Este pronóstico se basó en los datos disponibles hasta finales de mayo de 1979. Los expertos consideran que un resultado como éste es un «buen pronóstico».

Un nuevo procedimiento está despertando gran interés en los últimos tiempos debido a su elevada probabilidad de

acierto. Ha sido desarrollado en Estados Unidos y se basa fundamentalmente en el empleo de ordenadores. Se introducen los datos actuales en la máquina, que los compara con los mapas del tiempo que tiene en la memoria. Antes se han tipificado e introducido en el ordenador las evoluciones del tiempo observadas en una región a lo largo de varios años. El pronóstico resulta muy sencillo: el ordenador selecciona en su memoria el proceso cuya situación inicial coincida mejor con los datos actuales. Con este método se ha conseguido la mayor probabilidad de acierto nunca alcanzada. Llama la atención el hecho de que este método es casi totalmente empírico y, en realidad, apenas requiere conocimientos de meteorología.

Fig. 5-2. Ejemplo de pronóstico del tiempo (columna de la izquierda) en Estados Unidos: temperatura (arriba) y precipitaciones (abajo). La comparación con la situación observada (columna de la derecha) muestra el problema de las desviaciones locales. La tendencia general estaba bien prevista. El de este ejemplo es considerado un excelente pronóstico.

El CO_2 tiene —junto con el vapor de agua y todos los gases poliatómicos de los que hay rastros en la atmósfera, tales como el ozono, el nitrógeno, el dióxido de azufre, los hidrocarburos

halogenados, entre otros— una importancia decisiva para el calentamiento de la atmósfera. La luz de onda corta no se ve influida por el CO_2, pero absorbe mucho CO_2 en la zona de onda más larga. El máximo de la energía emitida por el Sol se encuentra en la parte visible del espectro electromagnético. La superficie terrestre emite, de acuerdo con su baja temperatura, en el infrarrojo, de mayor longitud de onda, donde absorbe CO_2.

El efecto resultante de ello es que el equilibrio de la radiación se ve alterado por el hecho de que la radiación infrarroja que la Tierra devuelve normalmente al espacio es reabsorbida en la atmósfera, que se ve calentada. Un jardinero hace lo mismo en el invernadero, por lo que este efecto se llama «efecto invernadero». El rápido aumento de los «gases responsables del efecto invernadero» durante los últimos 40 años producirá un incremento medio de la temperatura de la atmósfera, a principios del próximo siglo, de aproximadamente 2-3 grados.

El físico sueco Svante Arrhenius manifestó en 1896 que el aumento del contenido de CO_2 en la atmósfera podía producir alteraciones en el clima global, advertencia que repetiría el inglés T. C. Chamberlin en 1899. Hasta aquí no se trata de nada nuevo. Pero lo que ellos temían era que esos cambios se iban a producir a finales del siglo pasado. Como no ocurrió nada apreciable, durante los 50 años siguientes no se tomó en serio esta cuestión. En los últimos tiempos ha crecido el interés por la materia, y no por casualidad. Hoy se habla, y con motivo, del «problema» del dióxido de carbono.

Sabemos que el contenido de CO_2 en la atmósfera está aumentando en todo el mundo. Pero existe también una fuerte interacción entre el contenido de CO_2 en la atmósfera y en la biosfera (absorción del CO_2 a través de la asimilación), con un marcado carácter estacional (v. figura 5-3). Junto a este efecto hay otros como, por ejemplo, la interacción con las superficies de los océanos, en los que se disuelve gran cantidad de CO_2.

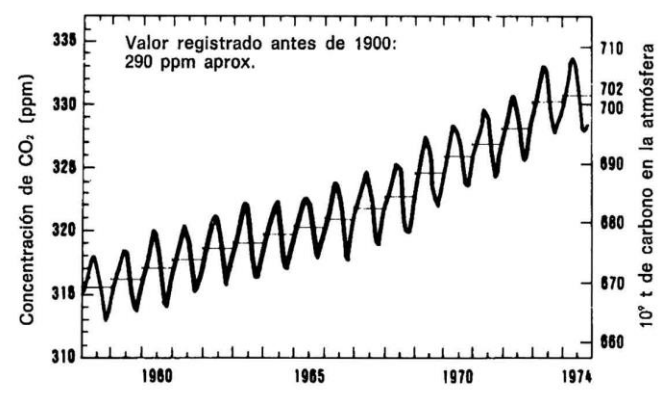


Fig. 5-3. Variación del contenido de CO_2 en la atmósfera según mediciones del observatorio de Mauna Loa, en Hawái. Se aprecia el ciclo verano-invierno de la fotosíntesis y la tendencia ascendente.

En la biosfera de la Tierra también se produce CO_2, que pasa a la atmósfera (p. ej., por nuestra respiración); los propios océanos hacen otro tanto. Pero como sea que la producción natural de CO_2 se halla en equilibrio con la atmósfera, el aumento observado tiene que estar causado por la combustión provocada por el hombre y los procesos industriales (p. ej., la fabricación de cemento). La concentración de CO_2 (y de otros gases responsables del efecto invernadero como el metano), así como la temperatura que reinaba antes de la combustión forzada del carbón, se puede establecer en 270... 290 ppm mediante el análisis de inclusiones de aire en probetas de hielo procedentes de Groenlandia y la Antártida. Resulta difícil realizar estos cálculos, pues no se puede cuantificar con exactitud el contenido de CO_2 en la atmósfera. Aunque siempre es posible realizar estimaciones (calculando, p. ej., la reducción de la superficie ocupada por los bosques o analizando qué abonos ceden CO_2 a la atmósfera), existen grandes probabilidades de que resulten erróneas. Según ellas, el aumento del contenido de CO_2 en la atmósfera provocado por el hombre podría ser de hasta un

25%[10]. Al efecto invernadero contribuyen también los hidrocarburos halogenados (con un crecimiento del 5% anual), el metano (cuya tasa de crecimiento es aproximadamente de un 2% anual). Estos gases, si no se frena su aumento, tendrán dentro de 30 años una contribución al efecto invernadero mayor que el CO_2.

Podemos hacer una comparación con nuestros planetas vecinos, Venus y Marte. Ambos tienen una atmósfera de CO_2 en la que se produce un considerable efecto invernadero, pero sin rastro alguno de vida. La Tierra se encuentra entre los dos. Si tuviera una atmósfera de CO_2, en su superficie la temperatura sería bastante superior a la actual; probablemente se situaría en torno a los 50°. Aunque es posible que en tales circunstancias no desapareciera totalmente la vida, sí se reduciría a unas cuantas especies, como sabemos por los desiertos. Podríamos j crear una atmósfera así si cediéramos el carbono de la Tierra a la atmósfera (y produjéramos al misino tiempo CO_2)

Dos terceras partes de la producción actual de CO_2 a partir de combustibles fósiles se localizan en las naciones industrializadas (Estados Unidos, Unión Soviética. Europa. Japón). Pero esta situación va a cambiar, pues el denominado Tercer Mundo ha empezado a producir energía, y por tanto, también CO_2. En comparación con Europa, la industrialización de los países en vías de desarrollo sigue un ritmo acelerado.

En la fotosíntesis, las plantas toman hidrógeno del agua y forman compuestos orgánicos (el oxígeno de la atmósfera procede del agua, no del CO_2), prefiriendo el protón a su isótopo el deuterio. Por eso los hidrocarburos fósiles son pobres en deuterio. Sin embargo, una gran parte del petróleo y del gas natural muestra la proporción D/H natural, por lo que es muy probable que no proceda del material biológico. Así pues, disponemos de mucho más carbono del que la naturaleza ha retirado de la atmósfera con ayuda de la fotosíntesis. Es posible que la Tierra, al igual que los meteoritos, haya recibido una

---

[10] Éste es el motivo por el que son tan variables los datos sobre el aumento del contenido de CO_2 en la atmósfera.

parte de «su» carbono en la condensación en forma de complejos compuestos cíclicos. Esto hace que no resulte fuera de lugar la tesis de que en la actualidad se siguen liberando hidrocarburos en el interior de la Tierra (p. ej., metano). Suelen salir al exterior por grietas, esto es, allí donde hay actividad tectónica. Es curiosamente en estos lugares donde se encuentran los yacimientos de gas y petróleo más importantes. El gas del interior de la Tierra podría acrecentar así continuamente los yacimientos biológicos. Un apoyo de esta tesis es la actividad tectónica existente en las grandes profundidades. Con las temperaturas allí reinantes habría que esperar que, como reacción a las tensiones, se produjera una deformación plástica del material. Cuando existe un foco sísmico a tales profundidades, sólo se puede pensar que ha habido un escape de gas, con el derrumbe de una cavidad.

Otro de los efectos del hombre sobre el clima está relacionado con la producción de calor, que determina también un aumento global de la temperatura de la atmósfera. Entre todas las transformaciones de energía que realizamos, sólo hay dos que no alteran el complicado equilibrio térmico de la Tierra: el aprovechamiento hidráulico y la transformación de la energía solar en materia vegetal. Según cálculos aproximativos, la producción de calor actual hace aumentar 0,01°C la temperatura media del aire. Aunque insignificante, este valor tiene una gran importancia local. La temperatura puede aumentar hasta 10°C en los lugares donde se ponen trabas a la circulación atmosférica —por ejemplo, en algunas ciudades—. Con el actual incremento mundial del consumo de energía en un 5% anual cabe esperar que la temperatura media del aire ascienda varios grados. Por otro lado, las regiones cubiertas de nieve y hielo reflejan una gran parte de la luz solar, con lo que la atmósfera se encuentra más fría en ellas. Si bien el descenso de las temperaturas crea regiones cubiertas de nieve, en el caso de las zonas polares ocurre lo contrario. Así pues, el aumento de la temperatura media como consecuencia de la actividad humana lleva inevitablemente a una reducción de las zonas cubiertas de nieve, con lo que el aire se enfría en una zona más pequeña que antes, el calentamiento es mayor, etc.

Diversas mediciones realizadas en Escandinavia y Alaska en los últimos años han demostrado que existe un eficaz mecanismo de transporte desde las latitudes medias hasta las altas. A través de la combustión de materias fósiles se forma también abundante dióxido de azufre, que se deposita en las regiones polares y convierte los mares en charcos de ácido sulfúrico. Se ha comprobado que procede de Europa y Norteamérica. A estas regiones también llega aerosol —un polvo fino producido por la actividad humana—, que se deposita sobre las superficies nevadas. Quien haya esparcido cenizas sobre la nieve en un día soleado de invierno conoce la rapidez con que aquélla puede desaparecer. A este hecho se añade un factor no menos peligroso: la fusión del hielo polar. Junto con el aerosol, llega también CO_2 a las regiones árticas.

Como hemos visto, nuestro clima es muy sensible a las variaciones *de* la radiación que llega a la Tierra. Los modelos de cálculo predicen que una reducción de tan sólo el 2% en la intensidad de la radiación del Sol determinaría ya que el planeta se cubriera totalmente de hielo y que, por otro lado, un aumento mínimo de la misma provocaría la fusión de los casquetes polares.

El polvo suspendido en la atmósfera ejerce, sin duda, una evidente influencia sobre nuestro clima. Las grandes erupciones volcánicas, como la del Krakatoa el 27 de agosto de 1883 [11] o la de El Cichon en abril de 1982, han tenido efectos considerables. En diferentes ocasiones se ha discutido el impacto sobre la Tierra de gigantescos meteoritos de varios kilómetros de diámetro. La caída de uno de estos meteoritos en el océano habría podido provocar su penetración en el fondo marino, de modo que el magma, al salir, habría dado origen a una situación comparable a una gigantesca erupción volcánica. Las cenizas

[11] Según un informe de la revista norteamericana «Science» (12, 1888, pág. 27), tras la erupción una onda atmosférica dio siete veces la vuelta al globo a lo largo del meridiano casi a la velocidad del sonido. El estruendo se pudo oír a una distancia de 2.000 millas (más de 3.200 km). F.I velo de polvo (con partículas de 1.6 pm), que se formó a grandes alturas, provocó fenómenos crepusculares observables en todo el planeta (bordes coloreados de las nubes, etc.).

volcánicas permanecen en la estratosfera durante muchos años; un fenómeno de esta dimensión podría haber determinado una fuerte reducción de la energía solar que llega a la Tierra y constituye probablemente otra explicación de la aparición de las glaciaciones.

La variación del contenido de polvo en la atmósfera provoca oscilaciones de algunas décimas en la temperatura media. En ocasiones se ha discutido la posible existencia temporal de un anillo de polvo alrededor de la Tierra (como en Saturno o Júpiter). Su origen podría ser el material de los meteoritos. Podría haber existido un anillo de este tipo durante muchos millones de años. En relación con este hecho quizá se haya producido una dramática reducción de la radiación solar en el hemisferio norte, unida a descensos de hasta 20°C en la temperatura. Esto explicaría el período glacial del terciario, así como la diversidad de los procesos glaciales en los hemisferios norte y sur en el pleistoceno.

El enturbiamiento de la atmósfera por las partículas de aerosol (se trata, como ya hemos mencionado, de partículas de polvo suspendidas en la atmósfera durante largos períodos de tiempo) alcanza en las grandes ciudades valores de hasta el 50%. Otras fuentes antropógenas son los grandes incendios forestales que se repiten todos los años y la quema de campos de cultivo en grandes extensiones, y también de sabanas. En las zonas de estepa cultivadas, la concentración de polvo es superior al enturbiamiento atmosférico de las grandes ciudades. El efecto del aerosol con partículas de diámetros inferiores a 0,5 pm tiene una importancia decisiva, pues debido a la dispersión casi isótropa de la luz puede provocar un enfriamiento neto. La concentración de polvo en la alta atmósfera alcanza unas dimensiones que apenas se han registrado en el pasado como consecuencia de catástrofes naturales (erupciones volcánicas, impacto de meteoritos). Sin embargo, erupciones volcánicas como la de Krakatoa en el año 1883 sí han tenido efectos visibles sobre el clima.

A todo ello se une la producción de energía por el ser humano, que en zonas de grandes aglomeraciones alcanza, con 1 vatio/m^2, un determinado porcentaje del balance de radiación

natural. A lo largo de la historia se ha ido poniendo en cultivo cada vez más superficie continental. Se ha destruido casi una tercera parte de los bosques existentes en un principio, y esta alteración de la vegetación natural ha tenido graves consecuencias sobre el calor de la Tierra: han variado el albedo y la rugosidad de la superficie, se ha reducido el calentamiento de radiación, ha aumentado el enfriamiento a causa de los vientos. El hecho de que la superficie desértica aumente casi 1 km por año (zona del Sahel) no se debe a alteraciones climáticas: es una consecuencia directa de las actividades humanas. A ello se une la alteración del equilibrio hidráulico debida, fundamentalmente, al «aprovechamiento» de las aguas subterráneas fósiles. Los expertos prevén que el aumento mundial de la evaporación va a conducir en un futuro próximo a un dramático agravamiento del problema del agua, que sería al menos tan crucial como el de la energía.

VI. JÚPITER, SATURNO, URANO, NEPTUNO, PLUTÓN: LOS PLANETAS EXTERIORES

El planeta de mayor tamaño del Sistema Solar es Júpiter (lámina 3). Su masa es dos veces mayor que la de todos los demás planetas juntos. El Sol y Júpiter tienen el 99,9% de la masa del Sistema Solar. El tamaño de este planeta constituye por sí solo un motivo para hablar de él. Como veremos más adelante, se podría pensar que Júpiter y el Sol deberían haber constituido un sistema de estrellas dobles. En realidad, Júpiter es sólo un poco más pequeño de lo que debe ser una «estrella»; según la definición, un objeto se considera una estrella si en su interior la fusión nuclear determina una emisión de energía. En este sentido, Júpiter es una «cuasi-estrella» y en él se observan algunos fenómenos típicos de las estrellas. Debido a su gran velocidad de rotación, en diferentes ocasiones se ha considerado que su magnetosfera es un posible modelo de los alrededores de una estrella de neutrones.

Júpiter se mueve con una velocidad media de 13,03 km/s en su órbita, que se halla cinco veces más lejos del Sol que la de la Tierra; tarda unos 12 años en dar una vuelta alrededor del Sol. La órbita es casi circular y muestra una inclinación de casi un grado con respecto a la eclíptica. La distancia entre Júpiter y la Tierra varía entre 4 y 6,4 UA., según la situación relativa de ambos planetas. Júpiter y Saturno tienen períodos de revolución de ~12 y ~30 años respectivamente, lo que da una proporción aproximada de 2:5. Esta «casi-conmensurabilidad» de los períodos provoca alteraciones en las órbitas de ambos planetas. En consecuencia, sus velocidades de revolución aumentan y disminuyen alternativamente, en períodos que duran unos 900 años. P. S. Laplace explicó en 1784 este fenómeno por vez primera. Las desviaciones con respecto al movimiento regular en una órbita elíptica pueden alcanzar hasta 0,3° en Júpiter y 0,8° en Saturno. Debido a su gran masa (casi una milésima

parte de la masa solar), Júpiter provoca notables alteraciones en las órbitas del resto de los planetas del Sistema Solar, y sobre todo en sus vecinos Marte y Saturno, en los asteroides y en los cometas.

El estudio de Júpiter es, desde hace tiempo, un importante objetivo de la investigación espacial. Esta empresa ha sido posible gracias a los avances técnicos. Estados Unidos envió a Júpiter en 1972 y 1973 las sondas Pioneer 10 y 11, que pasaron por las proximidades del planeta los días 4 de diciembre de 1973 y 3 de diciembre de 1974. Los datos que estas sondas recogieron y enviaron a la Tierra fueron tan sorprendentes que se decidió proseguir el estudio de Júpiter con dos nuevas sondas, que recibieron los nombres de Voyager 1 y 2, y con un satélite (Orbiter), el «Galileo», destinado a girar alrededor del planeta. También se proyectaron pruebas para el estudio de la atmósfera. Si las sondas Pioneer eran del tipo «Spinner» —esto es, satélites que rotan en torno a un eje—, para el programa Voyager se eligió el tipo «Mariner» —satélites con tres ejes—. Es evidente que con este sistema se pueden obtener fotografías mucho mejores. Bien es verdad que otras mediciones resultan más difíciles. Con el programa Voyager también se aumentó el número de datos transmitidos (banda S en lugar de VHF[12]). De este modo, las sondas Voyager, que pasaron por Júpiter los días 5 de marzo y 9 de julio de 1979, consiguieron una gran cantidad de fotografías del planeta y de sus lunas. Es difícil decir qué resulta más asombroso: la perfección técnica de las fotografías o el mundo desconocido, tan diferente, de ese planeta, del que las imágenes nos ofrecen una visión fascinante. Esto nos ha llevado a seleccionar para este libro una serie de fotografías tomadas desde los Voyager. En noviembre de 1980 y en agosto de 1981 las sondas Voyager pasaron por las proximidades de Saturno, en enero de 1986 por las cercanías de Urano y en agosto de 1989 junto a Neptuno.

---

[12] Banda S = 1-3 GHz; VHF = 30-300 MHz.

El tamaño de Júpiter ya se conocía antes de los vuelos de los satélites gracias a las mediciones realizadas con instrumentos ópticos desde la Tierra. Se puede determinar a partir del paso del planeta por delante de una estrella situada a gran distancia. Este «eclipse estelar» se repite en casi todos los planetas. Se mide el tiempo que dura el eclipse y, con la ayuda de la velocidad orbital, ya conocida, se calcula el diámetro. La masa se conoce ya por la ley de la gravitación, por lo que se puede calcular también la densidad media. Las dimensiones de Plutón se determinaron de este modo durante un eclipse estelar en el año 1965 y en 1968 se presentó una gran oportunidad para realizar la medición en el caso de Neptuno. Por lo que respecta a Saturno, no ha resultado posible realizar tales mediciones. A partir de la observación de las lunas de un planeta se calcula, a través del potencial de gravitación, la distribución de las masas. Con ayuda de las teorías físicas, y aunque se disponga de muy pocos parámetros, de este modo se consigue elaborar un modelo (probablemente bastante exacto) de la estructura interna de un planeta.

Los pasos de las sondas espaciales por Júpiter y Saturno nos permiten prescindir de tales observaciones en el caso de estos dos planetas: hoy se conocen sus dimensiones con una casi total exactitud. El achatamiento de Júpiter es de aproximadamente 1/16: la distancia desde el punto central al polo es menor que la del centro al ecuador (67.232 y 71.714 km de radio). Esto es lo que se denomina achatamiento «dinámico», pues está relacionado con la gran velocidad de rotación del planeta. También existe una gran fuerza centrífuga, que es más fuerte en el ecuador. De este modo adquieren los planetas la forma de elipsoides de rotación. El período de rotación de Júpiter, de apenas 10 horas, es más corto que el de todos los demás planetas. También son muy intensas las fuerzas que actúan en la superficie y en la atmósfera. La velocidad de rotación no se puede medir ópticamente, calculando el tiempo que transcurre entre el paso de dos estructuras «fijas» (en el caso de Júpiter, p. ej., la Gran Mancha Roja), ni tampoco estimando el efecto Doppler de las señales radioeléctricas (o señales ópticas) en los bordes izquierdo y derecho del disco del planeta.

Para poder orientarse hay que establecer un sistema de coordenadas fijo en los planetas. En Júpiter existen tres, que se denominan sistemas I, II y III. Los dos primeros (más antiguos) se establecieron ópticamente; el tercero, con técnicas radioeléctricas.

El sistema I se emplea para caracterizar todos los fenómenos de la zona ecuatorial. Cuando fue delimitado (O^h T.U., v. tabla 6-1), el meridiano central tenía una longitud $\Omega_1 = 47{,}31°$. El sistema II se utiliza para los fenómenos que transcurren más allá del cinturón ecuatorial, de ± 10 grados de latitud de anchura. El meridiano central tenía en el momento de la fijación la longitud $\Omega_2 = 96{,}58°$. El sistema III se basa en las modernas observaciones da radioondas y se emplea exclusivamente para el reconocimiento de la magnetosfera de los planetas. Se asienta en observaciones realizadas con radioondas de 18 MHz. La Unión Astronómica Internacional (UAI) aceptó este sistema en el año 1962.

Tabla 6-1. Sistemas de coordenadas de Júpiter

Sistema	Época	Período de rotación	Tasa de rotación grados/día
I	14.7.1897 O^h T.U.	9^h 50'30",003	877,90
II	14.7.1897 O^h T.U.	9^h 55’40",632	870,27
III	1.1.1957 O^h T.U.	9^h 55'29",370	870,544

Los períodos de rotación observados se mantuvieron constantes hasta el año 1961. En los años siguientes se observó de pronto una alteración (10°/año), que correspondía a una variación del período de rotación de Júpiter en algo más de un segundo. Las irregularidades en el período de rotación de la Tierra se miden en milisegundos. Esta variación resulta enorme en comparación con las 10 horas que dura el periodo de rotación de Júpiter. El modo más sencillo de explicar una variación observada en el sistema III es relacionarla con una variación en el campo magnético, que a su vez está determinada por una alteración en el núcleo. Esto podría relacionarse a su vez con una alteración, observada casi al mismo tiempo, del período óptico de la Gran Mancha Roja en casi 1 segundo.

El eje de rotación del planeta está inclinado unos 87 grados respecto de la eclíptica. La densidad media de Júpiter —calculada para un esferoide achatado con una masa de M = 1.901×10^{30} g y un radio en el ecuador de R = 71.714 km— es de 1,33 g/cm^3; la aceleración de la gravedad en la superficie alcanza el valor de 2,6 g, siendo g la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre (g = 980,6 cm/s^2). Si se evalúan los rasgos presentes en los modelos de planetas y se comparan con las características observables, se aprecia que un modelo con una fuerte concentración de masa en el núcleo del planeta reproduce casi exactamente los valores de la aceleración de la gravedad-obtenidos experimentalmente, aceptándose la hipótesis del equilibrio hidrostático. Esta hipótesis no está en contradicción con las mediciones gravitacionales realizadas con las sondas Voyager en 1979. Su paso por Júpiter permitió calcular con bastante exactitud el potencial gravitacional del planeta.

De ésta y de otras maneras se intenta forjar una idea acerca de la estructura interna del planeta. Así, se toman en consideración los parámetros conocidos —masa, radio, campo de gravitación—, las ecuaciones de estado para el material y los argumentos cosmogónicos en relación con la composición química de Júpiter. El hecho de que las densidades de los planetas disminuyan a medida que aumenta la distancia con respecto al Sol (fig. 3-9) y las teorías sobre el origen del Sistema Solar apoyan la idea de que Júpiter se compone fundamentalmente de hidrógeno. E. P. Wigner y H. B. Huntington estudiaron en 1935 las características del hidrógeno a gran presión, con sus propiedades metálicas. Esto permitió elaborar interesantes modelos para Júpiter, apreciándose que este planeta sólo se podía «hacer» si al menos un 75% de su masa era hidrógeno.

El modelo del planeta aceptado en la actualidad es el siguiente: el núcleo (de radio desconocido) se compone de material rocoso (en su mayoría hierro y silicatos), cuya temperatura alcanza probablemente los 30.000°K (no más). La masa de este núcleo podría ser diez veces superior a la de la Tierra. Rodeando al núcleo se encuentra una espesa capa de hidrógeno metálico (que se extiende hasta unos 46.000 km), en la cual

podría haber una presión de un millón de atmósferas y una temperatura de más de 10.000 grados. En estado fluidometálico, las moléculas de hidrógeno están disociadas en átomos, y el fluido es conductor de la electricidad. Las condiciones para la formación de una dinamo están dadas, de modo que el modelo puede explicar también el fuerte campo magnético del planeta. A continuación, y hasta los 70.000 km de radio, aparece el hidrógeno en forma molecular y se extiende hasta el borde superior de las nubes en la atmósfera. En este modelo se establece que el calor que Júpiter emite hacia el exterior procede todavía hoy del calor de la contracción debida al colapso gravitacional y no tanto de la desintegración radiactiva (que desempeña, sin duda, un papel importante, v. tabla 6-2).

Al comenzar este capítulo hablamos de la semejanza entre Júpiter y una estrella. ¿No podría haber en el núcleo del planeta al menos un pequeño «horno nuclear»? Como ya hemos dicho antes, la masa de Júpiter es mil veces inferior a la del Sol. Pero de la teoría del origen de las estrellas se desprende que para que se produzca la fusión nuclear deben darse temperaturas de al menos 15 millones de grados, que en una estrella que sufre un colapso gravitacional sólo se pueden alcanzar cuando su masa es al menos cien veces inferior a la del Sol. Por tanto, queda descartada la posibilidad de que exista fusión nuclear en el interior de Júpiter.

La radiación térmica emitida por el planeta (T = 125°K) es casi dos veces superior a la energía que le llega desde el Sol (1/27 de la constante solar de la Tierra). Debido al elevado albedo de Júpiter (0,45), sólo llega a la atmósfera del planeta el 58% de la energía emitida por el Sol (por eso está tan claro por la noche). Dado que el flujo térmico es independiente de la latitud, es de suponer que el transporte del calor se realice en el interior del planeta, no en la atmósfera. Este es uno de los aspectos sin resolver de este modelo, pues de Júpiter sólo podemos ver la parte superior de su atmósfera, y no las capas situadas por debajo.

Tabla 6-2. Características de los planetas exteriores

Planeta	Temperatura de la superficie grados Kelvin	Albedo	Flujo de calor por la superficie erg/cm^2 s
Júpiter	125 ± 4	0,42	7.600
Saturno	94 ±7	0,36	2.800
Urano	58 ±2	0,37	<180
Neptuno	55 ± 2	0,33	285

Según W. B. Hubbardj. Rev. Geophys. Space Sci., 18, 1980, 1-9,

La temperatura de un planeta está determinada por la energía solar que recibe y por el consumo que hace de ella. Júpiter sólo aprovecha una mínima parte de la energía solar, por lo que tiene una temperatura muy baja. Las primeras estimaciones establecieron el valor en torno a 100°K. Donald H. Menzel realizó en 1926 las primeras mediciones radiométricas en el infrarrojo y estableció, ante el asombro general, la temperatura de 130° K, equivalente a la de un cuerpo negro. Las mediciones realizadas con las sondas Voyager han confirmado este resultado (125 ± 3ºK). Junto a esta emisión térmica existe una radiación no térmica, esto es, una radiación relacionada con la propia dinámica del planeta. De ella hablaremos en el capítulo XIII al ocuparnos de su magnetosfera.

Prescindiendo de su núcleo, Júpiter debe ser semejante a un fluido bien mezclado. Su composición se parece a la del Sol y quizá también a la de la primitiva nebulosa solar.

Júpiter es, con excepción de la Tierra, el único planeta de cuyas propiedades electrodinámicas hemos tenido conocimiento antes de la era de los viajes espaciales. Esto ocurrió en 1955 tras el descubrimiento de la emisión radioeléctrica de Júpiter, que al principio se consideró como una radiación ciclotrón de iones, por lo que en un primer momento se estableció un campo magnético demasiado intenso (10 teslas). Cuando dos físicos norteamericanos (D. B. Chang y L. Davis Jr.) interpretaron en 1962 la radiación como radiación sincrotrón[13] de

[13] Toda aceleración de una carga eléctrica lleva a la emisión de radiación electromagnética. Si en el campo magnético una partícula con carga es desviada

electrodes (lo que en un principio se consideró absurdo), se fijaron valores plausibles: 10 militeslas en las proximidades del polo, un momento magnético de $1{,}55\times10^{26}$ teslas cm^3. Al igual que en la Tierra, el mejor modo de describir el campo fue suponer la existencia de un dipolo excéntrico desplazado 0,1 del centro del planeta e inclinado con respecto al eje de rotación.

Saturno *(lámina 4)* ha sido considerado durante mucho tiempo como el más exterior de los planetas. No lo es, pero sí sigue siendo el segundo más grande, después de su «primo» Júpiter, al que se parece en muchos sentidos. Tiene la densidad más baja (0,674 g/cm^3) de todos los cuerpos existentes en el Sistema Solar. Rodeado de anillos de polvo, circundado por más de 17 lunas (entre las cuales Titán es la segunda más grande del Sistema Solar), ha sido considerado durante mucho tiempo como un planeta exótico, un sistema solar en miniatura con su propio cinturón de asteroides (anillos). Tarda 29,5 años en dar una vuelta alrededor del Sol y a nuestros ojos ofrece un color amarillento, más brillante que el del resto de las estrellas a causa de su elevado albedo. Con una masa 95 veces superior a la de la Tierra ($5{,}69\times10^{29}$ g), cabe pensar que tiene un núcleo quince veces mayor que el terrestre, formado por elementos muy pesados que constituyen una mezcla de roca y hielo.

Saturno tiene ionosfera, como se sabe desde las mediciones de radioocultación realizadas con el Pioneer 11. Las radioondas traspasaron la ionosfera que recubre al planeta poco antes de que la sonda desapareciera tras él. Una onda electromagnética linealmente polarizada gira su plano de polarización cuando pasa por medio que contiene electrones libres. Esta rotación, denominada efecto Faraday, se puede medir, lo que permite determinar la concentración de electrones a lo largo del rayo de luz. Se ha descubierto que la densidad de electrones

---

de su trayectoria, se habla de radiación de frenado magnética o «radiación sincrotrón».
Dado que la energía contenida en una partícula (m_0c^2) aparece en el denominador de la expresión de la energía emitida, esto representa la emisión, por parte de los electrones, de una radiación que se puede medir.

tiene sus máximos en 9.400 y 7.000 electrones/cm^3 a 2.800 y 2.200 km de altitud sobre la superficie de Saturno.

El período de rotación del planeta, que resulta muy difícil de determinar desde la Tierra, se ha conocido gracias a las mediciones de las sondas Voyager y se sitúa en 10 horas, 39 min y 24 s. Este período de rotación es sólo un poco más largo que el de Júpiter, por lo que se pensó que Saturno debía mostrar las mismas características que Júpiter debe a su gran velocidad de rotación. Y esta hipótesis se ha confirmado: la estructura de la atmósfera presenta también zonas y bandas, si bien sus colores no son tan intensos como en Júpiter. La magnetosfera muestra, al igual que en este último, características determinadas por la rotación (hablaremos de ello en el capítulo dedicado a la magnetosfera). Esta rápida rotación hace que el planeta esté muy «achatado»: tiene un ensanchamiento en el ecuador, con lo que existe una diferencia de casi 6.006 km entre los radios polar y ecuatorial.

También Saturno emite al espacio una mayor cantidad de energía que la que recibe del Sol (v. tabla 6-2). En su superficie hay una temperatura de 94°K. y casi toda la energía se produce en longitudes de onda superiores a 10 µm (por lo que resultan especialmente importantes las mediciones encesta parte del espectro).

Al igual que en el caso de Júpiter, se considera que la única fuente posible es la energía gravitacional. Existen tres vías diferentes por las que la energía gravitacional se puede convertir en radiación: en primer lugar, una rápida contracción en la primera fase de formación del planeta podría haber determinado la aparición de una gran cantidad de energía interna (en forma, p. ej., de una temperatura más alta), que se desprende desde entonces. En segundo lugar. Saturno podría contraerse todavía hoy lo suficientemente deprisa como para producir la energía necesaria (que observamos). A este respecto se ha comprobado que en el interior del planeta no se manifiesta cambio alguno. Sin embargo, y en tercer lugar, la energía química que se libera lentamente podría mantener el abastecimiento de energía a través, por ejemplo, de procesos de mezcla. Como es lógico, resulta difícil encontrar en los alrededores de un planeta huellas

de su anterior luminosidad. Y la duración de la vida humana no permite tampoco valorar las modificaciones de la cantidad de energía. La determinación de la proporción de helio e hidrógeno es, una vez más, la primera referencia para poder reducir el número de modelos.

Saturno tiene también atmósfera, pero no se conoce con exactitud su extensión. En la actualidad se hace referencia fundamentalmente a las mediciones de la intensidad de la línea alfa de la serie de Lyman del espectro del hidrógeno, con cuya ayuda se puede determinar la densidad del hidrógeno como función del radio. La atmósfera de Saturno debe extenderse hasta unos 600 km de altura y se halla compuesta principalmente de nitrógeno (N_2) y metano. Las mediciones del campo magnético han dado como resultado un valor de 20 microteslas en el ecuador, lo que corresponde a un momento magnético de $4{,}6\times10^{24}$ teslas cm^3. La polaridad se corresponde con la de Júpiter, por lo que es opuesta a la de la Tierra, aun cuando el planeta que nos ocupa tiene también un carácter dipolar. Curiosamente, el dipolo sólo está inclinado 0,7° con respecto al eje de rotación (~10° en la Tierra, casi 20° en Júpiter). Esto nos lleva a un modelo del interior de Saturno formado por un núcleo rocoso de 0,2 R_S, recubierto por una capa de hidrógeno no metálico. Esta se extendería hasta aproximadamente 0,5 R_S y estaría igualmente envuelta por una capa líquida de hidrógeno y helio. La capa de hidrógeno metálico es bastante más potente en Júpiter (0,75/R_S).

Urano se encuentra, al igual que los demás planetas, en la curva obtenida empíricamente relacionando el impulso de giro y la masa. La existencia de esta curva se interpreta de modo que resulta de la rotación del planeta antes de que sea frenado por las mareas. De ello se deduce que en el caso de Urano la rotación actual no es muy diferente de la primitiva.

Descubierto en 1781, Urano se convirtió en la sensación astronómica del siglo. Tarda 84 años en dar la vuelta al Sol y su órbita sólo está inclinada medio grado con respecto a la eclíptica. Pero, a diferencia de otros planetas, el eje de rotación de Urano se encuentra casi en la eclíptica: tiene una inclinación de 8º con respecto al plano de la órbita, situándose el polo norte

por debajo de éste. Urano posee un mínimo de 15 lunas y está rodeado por 18 anillos. Está muy achatado y su período de rotación (retrógrado) se calcula en $17{,}5^h$ (v. tabla 3-2). La densidad media es de 1,24 g/cm^3.Tiene un campo magnético de gran intensidad, cuyo eje dipolar está inclinado 60° respecto del eje de rotación; el dipolo está desplazado $0{,}3R_U$ respecto del centro, de modo que la intensidad del campo magnético en la superficie varía entre 0,001 y 0,011 teslas. Durante el movimiento del planeta alrededor del Sol su eje de rotación apunta alternativamente hacia el Sol o se encuentra en posición perpendicular respecto de la línea que une el planeta con el Sol. Por este motivo Urano presenta una magnetosfera extraordinariamente variable. Presumiblemente, su campo magnético se mantiene gracias a una dinamo. Se supone que posee un núcleo de metal y silicato, rodeado por una capa de agua, metano y amoníaco, que a su vez lo está por una atmósfera formada por vapor de agua, metano, hidrógeno y helio. Alternativamente se discute un modelo de capas en el cual el núcleo está rodeado por una atmósfera densa que contiene hielo y gas que se transforma hacia el exterior en un envoltorio de hidrógeno (con algo de helio). Presumiblemente, el planeta se formó a partir de material rico en hielo.

Urano está también rodeado de una importante corona de hidrógeno, al igual que todos los planetas (salvo Mercurio), porque las moléculas de hidrógeno son las que más fácilmente se pueden elevar hasta altas trayectorias parabólicas por encima de la densa atmósfera. El envoltorio de hidrógeno alcanza hasta los anillos, de modo que las partículas que forman los anillos pueden dar lugar a efectos de frenado debidos a colisiones con el gas (en el anillo ε aprox. hasta 100 cm^{-3}, v. fig. 8-8). A altitudes de entre 2.000 y 3.500 km sobre la superficie de 100 mbar encontramos una ionosfera estratificada.

La atmósfera del planeta Urano contiene fundamentalmente hidrógeno así como un 15% de helio, aprox. un 2% de metano y etano (30% del contenido en metano). En la zona de presiones entre 300 y 1.300 mbar existen nubes de metano que, para presiones de 1,3 bar y a una temperatura de 810°K, están formadas por partículas de hielo de metano. En ellas no hay ya

presumiblemente metano. El contenido de metano presente en la atmósfera hace que el planeta presente un aspecto verde azulado.

La temperatura en el polo y el ecuador es aproximadamente igual, en el nivel de 100 mbar es de 52 ± 2ºK. La temperatura de la exosfera alcanza los 750° K. Al igual que en los casos de Júpiter y Saturno, en Urano la energía térmica emitida es superior a la recibida del Sol. Aproximadamente el 30% de esta energía es probable que proceda del calor de condensación generado durante la formación del planeta, mientras que el resto se libera, al parecer, cuando se disuelve helio en hidrógeno metálico.

Una cuestión que sigue abierta es por qué el eje de rotación se encuentra en el plano de la órbita. Al parecer esto se debe a una colisión con un gran objeto.

Neptuno fue descubierto en 1846, cuando los astrónomos buscaban las causas de las desviaciones observadas en la órbita de Urano respecto de una órbita de tipo kepleriano. Galileo observó el planeta Neptuno hacia 1612, como se ha podido reconstruir a partir de sus detallados dibujos. Neptuno presenta una gran semejanza con Urano, tiene al menos ocho lunas, entre ellas Tritón y Nereida, conocidas desde hace tiempo. En las imágenes de Tritón (fig. 3-7) tomadas por la sonda Voyager se han descubierto recientemente columnas de humo, semejantes a las de los volcanes, formadas por polvo muy fino, que alcanzan alturas de hasta 8 km y que se extienden hasta 150 km en la dirección del viento, en el seno de la débil atmósfera de esta luna. Dado que Tritón es muy frío, es posible que la energía solar, absorbida en hielo de metano oscurecido, pueda dar lugar a la evaporación del hielo de nitrógeno situado debajo y generar de este modo la columna de humo lanzada a la altura, al igual que las emisiones de polvo de los cometas calentados.

La velocidad de rotación de Neptuno es mayor de lo que se había supuesto inicialmente. Esto hace que se parezca a Urano también en este aspecto. Sorprendió sobre todo que, en Neptuno, el eje dipolar del campo magnético estuviese muy inclinado (47°) respecto del eje de rotación. Además, el dipolo está desplazado aproximadamente 0,55 radios planetarios respecto

del centro. Al igual que los demás planetas exteriores. Neptuno está rodeado también por un gran número de pequeñas lunas oscuras y anillos de polvo.

La temperatura media de la atmósfera es de –213,7°C. Al igual que en los casos de la Tierra y de Urano, pero de forma distinta a como se observa en las atmósferas de Júpiter y Saturno dominadas por la rotación, en las regiones ecuatoriales existen vientos orientados hacia el oeste (es decir, retrógrados). Las velocidades de los vientos son mayores que en la Tierra y en Urano, o sea, de hasta 300 m/s, y ello a pesar de que la energía solar recibida es mucho menor (tan sólo un 5% de la disponible en Júpiter).

Urano y Neptuno forman, por lo tanto, un tercer grupo entre los planetas del Sistema Solar, junto con el de los terrestres y el formado por Júpiter y Saturno. Se diferencian de manera realmente significativa de estos últimos.

Plutón fue descubierto en 1930. Tiene aproximadamente el tamaño de Mercurio y posee al menos una luna. La excentricidad de su órbita es mucho mayor que la de otros planetas. Su perihelio se encuentra dentro de la órbita de Neptuno. Sin embargo, debido a la gran inclinación (17°) de la órbita respecto de la eclíptica, no es probable que ambos lleguen a chocar algún día. En 1989 Plutón se encontraba en su perihelio, y permanecerá durante el resto del siglo dentro de la órbita de Neptuno. Debido a estas notables características, no es seguro que se pueda considerar a Plutón como planeta en este sentido. Podría tratarse en principio de un asteroide lanzado a la actual trayectoria a causa de una perturbación de su órbita.

La luna de Plutón, Caronte, descubierta en época reciente, órbita el planeta a una distancia de 17.500 km con un período de 6,4 días —probablemente igual a la rotación del planeta— y una masa de 0,1 la masa del planeta. La densidad de Plutón se estima que es de 1-2 g/cm^3.

Plutón posee una atmósfera, constituida presumiblemente por hidrógeno y metano. La superficie clara cercana al polo de Plutón podría estar formada por hielo de metano; su región ecuatorial es más oscura. Plutón alcanzó en 1989 el perihelio de su órbita y estuvo tan cerca de la Tierra como no lo volverá

a estar hasta dentro de 248 años. Esta circunstancia se aprovechó para llevar a cabo observaciones especialmente intensas.

VII. OTROS MATERIALES: ASTEROIDES, COMETAS, METEORITOS, GAS Y POLVO

7.1 ASTEROIDES Y METEORITOS

La descripción del Sistema Solar quedaría incompleta si no se hablara también de sus cuerpos más pequeños. A los más grandes de entre éstos se les denomina planetoides (lo que en griego significa tanto como «parecidos a planetas») o asteroides, o sencillamente pequeños planetas. Se diferencian de los cometas por el tamaño: éstos últimos tienen un núcleo con un diámetro de unos pocos kilómetros y son muy activos cuando se aproximan al Sol. El diámetro de los asteroides, que son bastante más grandes, puede llegar a alcanzar, en cambio, los 1.000 km. Sin embargo, no tienen el tamaño suficiente como para ser visibles a simple vista. El asteroide más grande. Ceres, de 1.000 km de diámetro, fue el primero que se descubrió; fue visto por vez primera en 1801 (v. capítulo II). Hoy conocemos más de dos mil de ellos, aunque se calcula que existen más de cien mil.

Se denomina «meteoritos» a los cuerpos sólidos más pequeños que, cuando penetran en el campo de atracción de la Tierra, al entrar en contacto con la atmósfera dan lugar a fenómenos luminosos como las «estrellas fugaces». En casos aislados puede llegar algún fragmento a la superficie terrestre. El fenómeno luminoso que provoca un meteorito en la atmósfera recibe el nombre de meteoro. Los meteoros muy luminosos se denominan «bolas de fuego» o también, «bólidos».

Los meteoritos se observan con más frecuencia después de medianoche, ya que el observador se encuentra entonces en la parte anterior de la Tierra en su trayectoria alrededor del Sol. La inclinación del eje terrestre con respecto al plano de su órbita introduce una variación estacional. En el hemisferio norte la mayoría de los meteoritos se observan en otoño. En ocasiones, la Tierra atraviesa una «lluvia de meteoritos». Estas lluvias

reciben el nombre de las constelaciones en donde se localiza el «radiante» (punto de radiación): las órbitas de los meteoritos correspondientes a una lluvia se cortan, si se prolongan hacia atrás en un mapa celeste, en un determinado punto de la bóveda celeste, el «radiante». Esto se debe al movimiento propio de la Tierra (y es comparable a la impresión que tiene un automovilista durante una nevada: los copos de nieve parecen proceder de un punto). Corrientes de este tipo por las que la Tierra atraviesa en determinados puntos de su órbita, esto es, que se repiten todos los años, son las Líridas (20/21 de Abril), las Acuáridas (2-6 de Mayo), las Perseidas (2-22 de Agosto), las Oriónidas (6-26 de Octubre), las Leónidas (14-18 de Noviembre) y las Gemínidas (10-16 de Diciembre). Las Líridas se han relacionado ocasionalmente con el cometa 1861 I y las Perseidas con el 1862 II; las Acuáridas y las Oriónidas con el cometa de Halley y las Leónidas con el Tempel 2.

Los cometas constituyen una fuente de polvo interplanetario y, en consecuencia, también de meteoritos. Sin embargo, sólo se pueden identificar claramente como material de cometa tres meteoritos hallados en el suelo (los de Pribam, Lost City e Imisfree). Recientes investigaciones hacen suponer que el gran meteorito que cayó en 1908 en Siberia, cerca del río Tunguska pudo haber sido un cometa.

Aunque no es posible relacionar los meteoritos con determinados asteroides, es probable que una parte de aquéllos proceda de éstos.

Los asteroides tienen un especial interés para astrónomos y cosmólogos. Constituyen una «ventana» por la cual, podemos echar una mirada retrospectiva sobre la evolución del Sistema Solar. Si bien es probable que algunos asteroides sean restos de planetoides, ante todo y en primer lugar son restos de los procesos químicos y físicos en virtud de los cuales los planetas se formaron a partir de la nebulosa solar; contienen material químicamente primitivo, característico de los productos de condensación de la nebulosa solar, pues probablemente los asteroides no quedaron expuestos a los cambios térmicos y químicos («diferenciación») que afectaron los planetas y sus satélites.

La gran mayoría de los planetoides se mueven en órbitas situadas en la eclíptica (con muy pocas excepciones), entre las de Marte y Júpiter. Algunos tienen perihelios que se encuentran dentro de la órbita de Marte (p. ej., Eros) o incluso dentro de la órbita terrestre (asteroides Apolo). Sus períodos de revolución oscilan entre 2 y 12 años y en conjunto su masa no es superior a 1/2.000 de la masa terrestre. Se numeran según el orden en que son descubiertos, y a este número se le añade un nombre que elige el descubridor (p. ej., 1 Ceres). En un principio se eligieron nombres femeninos de la mitología griega. Los planetoides con órbitas anormales recibieron, por su parte, nombres masculinos: es el caso de «Ícaro», planetoide cuyo plano de la órbita muestra una inclinación de 21° con respecto a la eclíptica.

Todos los planetoides se mueven alrededor del Sol en órbitas «directas», es decir, en sentido contrario al de las agujas del reloj (mirando la eclíptica longitudinalmente desde el norte), como los planetas. Las órbitas se rigen a primera vista por leyes muy singulares, no tanto en relación con los semiejes y períodos de revolución apreciados, como en comparación con los períodos no apreciados. Estas zonas «prohibidas» son las denominadas «resonancias gravitacionales» de Júpiter. Por ello no existen planetoides con períodos de revolución de 1/2, 1/3, 1/4, etc., del período de Júpiter, de 11,86 años.

El conocido problema de los tres cuerpos, formulado por primera vez por el matemático francés Joseph Louis Lagrange, (1736-1813), sitúa en los puntos libres de fuerzas los denominados puntos de libración. Se hace referencia con ello al hecho de que en el sistema Sol-planeta un cuerpo de masa pequeña puede permanecer libre de fuerzas en cinco-puntos señalados (v. apéndice 5): En el sistema Sol-Júpiter los puntos de libración, situados en la órbita de Júpiter, están ocupados por dos grupos de planetoides, los «Troyanos». Un grupo ocupa el punto de libración situado 60º por delante del planeta y el otro el emplazado 60° por detrás (medición heliocéntrica).

Los planetas terrestres son bombardeados todavía hoy por pequeños cuerpos interplanetarios de masa superior a 10^{-15} g (v. fig. 7-1). Según estimaciones de diversos autores se parte

de un flujo de masa de 100 g/km^2/año. Uno de cada diez «meteoritos» que alcanzan a la Tierra (masas superiores a 100 g) resiste el viaje a través de la atmósfera y llega hasta la superficie. Son las únicas pruebas con que contamos acerca de este interesante material interplanetario.

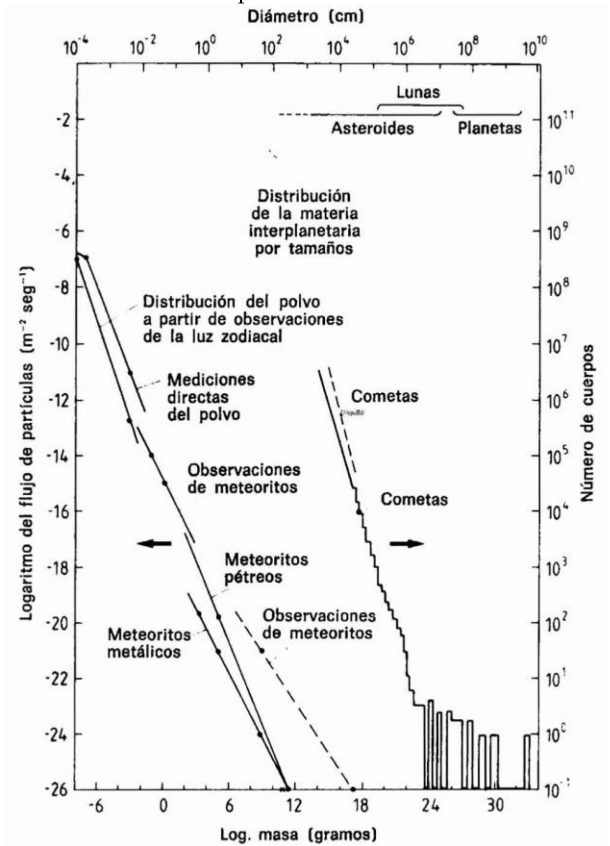


Fig. 7-1. Distribución de la masa en el Sistema Solar: el número de cuerpos aparece en relación con el logaritmo de la masa (escala de la derecha) En la mitad izquierda de la figura se ha representado para las masas más pequeñas el flujo de partículas en lugar del número de cuerpos La igual inclinación de ambas curvas indica que una misma ley rige la formación de los cuerpos más grandes y los más pequeños En la parte superior aparece la medida aproximada correspondiente a la masa indicada en la parte inferior.

Un químico inglés llamado E. C. Howard publicó en 1802 un artículo titulado «Observaciones sobre ciertas sustancias pétreas y metálicas que han caído sobre la Tierra en diferentes tiempos». Howard fue el primero en realizar un estudio químico de los meteoritos, si bien éstos se conocían desde hacía tiempo. En un libro aparecido en 1794, el físico francés E. F. F. Chladni, conocido por sus figuras, que permiten., visualizar sonidos, identificó como meteoritos las bolas de fuego observables ocasionalmente en el cielo, lo cual fue motivo de burla. H. W. Brandes y J. F. Benzenberg demostraron en 1798, en Gotinga, el indudable origen extraterrestre de los meteoritos. Pero no se les creyó hasta que en 1803 una auténtica lluvia de piedras cayó sobre el pueblo francés de L'Aigle (100 km al oeste de París), agujereando los tejados; se recogieron más de 2.000 «piedras». A pesar de todo, en fecha tan tardía como' 1845 (!) Alexander von Humboldt tenía dudas sobre su origen. Hacia 1800 existía en Viena un gran interés por los meteoritos, que incluso se coleccionaban. Cuando en 1812 Chladni contempló la colección acoplada por C. V. Schreibers, ésta se componía ya de 29 piedras y 9 meteoritos de hierro. En la colección de Viena —la más importante de su género— están representados en la actualidad casi 700 lugares donde han caído estos elementos. En total se conocen unos 1.500 lugares de caída. Los meteoritos pétreos aparecen con una frecuencia veinte veces mayor que la de los metálicos.

Las velocidades que pueden alcanzar los meteoritos en el espacio interplanetario llegan hasta la velocidad de escape que debe tener un cuerpo para abandonar el campo de gravedad del Sol, y que en las proximidades de la órbita terrestre se sitúa en tomo a 70 km/seg. Así pues, los meteoritos alcanzan eventualmente la Tierra con velocidades relativas de esta magnitud, pero también con velocidades menores, según el tipo de órbita. Sólo pueden llegar a la Tierra con velocidades relativas mayores los meteoros con órbitas hiperbólicas, cuyo origen no está en el Sistema Solar. Pero no se dispone de observaciones fiables a este respecto.

Tomemos como ejemplo los objetos Apolo-Amor, cuerpos con diámetros de entre 1 y 30 km, cuyos afelios se encuentran

en el cinturón de asteroides y que tienen órbitas muy excéntricas y dinámicamente inestables, pero con constantes temporales de la magnitud de la edad del Sistema Solar. Podrían llegar a las proximidades de la órbita terrestre en virtud de perturbaciones en su órbita y acrecentar, de este modo, el flujo de meteoritos en las proximidades de nuestro planeta. Pero no hay que desechar la idea de que una corriente de meteoritos nada despreciable procede de objetos desconocidos.

Cuando los meteoritos entran en el campo de atracción de la Tierra, son desviados de su órbita y dirigidos hacia nuestro planeta. Si se aproximan lo suficiente llegan a la atmósfera más densa, donde sufren un brusco calentamiento en cuanto alcanzan alturas inferiores a 150 km. Todos conocemos el fenómeno luminoso que se observa desde el suelo: las estrellas fugaces. Los meteoritos más pequeños se vuelven incandescentes y se volatilizan; los de tamaño medio, con masas de hasta 1.000 kg, pierden una parte de su material y caen sobre la Tierra como piedras más o menos grandes. Los objetos de mayor tamaño — pueden tener masas de hasta mil toneladas— pierden relativamente poco material en la atmósfera, no se frenan mucho y caen sobre el suelo con gran fuerza. La figura 7-2 ilustra la caída de un meteorito en la atmósfera.

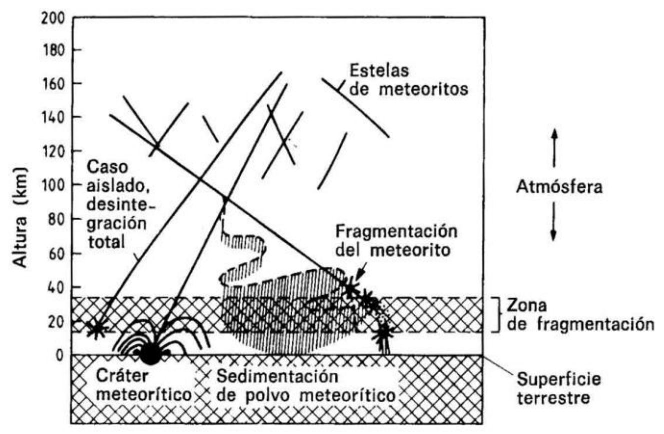


Fig. 7-2. Esquema de la caída de meteoritos en la atmósfera (según Gentner).

Conociendo la frecuencia del «paso» de meteoritos por nuestras proximidades y la distribución de las masas se puede calcular el tiempo medio que transcurre entre dos impactos de cuerpos de gran masa. Así, se ha obtenido un tiempo medio de 200 millones de años entre dos impactos de tal violencia. En la actualidad existen unos 700 asteroides con diámetros superiores a 1 km (objetos Apolo), cuyas órbitas cruzan la órbita terrestre. Éstos serían los candidatos para formar en el futuro sobre la Tierra grandes cráteres, como por ejemplo el de Arizona o el Nördlinger Ries. Mercurio, Venus, la Luna y Marte presentan un gran número de cráteres. Un impacto de este tipo constituye, sin duda, una violenta catástrofe natural para los habitantes de un planeta. Aunque un meteorito se volatiliza en parte durante su viaje a través de la atmósfera, en caso de llegar al suelo explota produciendo un gran cráter que en ocasiones alcanza los 200 km de diámetro. El material desplazado del suelo puede ser lanzado hasta grandes alturas y la situación es comparable a la de una violenta erupción volcánica.

Tomemos como ejemplo la erupción del Krakatoa, volcán de una isla situada en el estrecho de la Sonda, entre Java y Sumatra. Este volcán entró en erupción los días 26 y 27 de agosto de 1883 con violentas explosiones, en el transcurso de las cuales se lanzaron unos 18 km^3 de material a la atmósfera, de los cuales 4 km^3 alcanzaron la estratosfera, donde permanecieron durante aproximadamente dos años y medio. El polvo de esta explosión se dispersó por todo el mundo, formando en la alta atmósfera un considerable velo, cuya densidad media fue de 10^{-3} g/cm^3. Las puestas de Sol fueron en aquellos años auténticos espectáculos de colores, y se redujo la llegada de radiación solar. Semejantes, o aún más dramáticos, han sido numerosos impactos de meteoritos en el pasado, el último hace varios millones de años. Y pueden repetirse en cualquier momento.

Gustav Rose, minerólogo alemán, clasificó los meteoritos hallados y dio el nombre de condritos a los que mostraban las bolitas ya descritas antes de Howard (del griego «chondros» = semilla). Los meteoritos tienen una composición química y mineralógica muy variable, y es muy probable que no procedan

de un mismo cuerpo de gran masa. En cualquier caso, pueden dividirse en dos clases: meteoritos diferenciados y no diferenciados. A los indiferenciados se les denomina condritos porque a menudo contienen pequeñas bolitas (de 0,1 a 1 mm de diámetro) llamadas cóndrulos, compuestas de silicatos. En estos meteoritos no diferenciados las frecuencias relativas con que aparecen elementos como el magnesio, el hierro y el silicio son muy parecidas a las comprobadas en el Sol, hecho descubierto en 1929 por H. N. Russell en el Mount Wilson Qbservatorium mediante métodos espectroscópicos. Los condritos son pobres en materiales fácilmente volátiles (como el carbono, el nitrógeno, el azufre, etc.), y sólo se encuentra una mayor proporción de éstos en aquellos que contienen carbono. Aparte de eso, se supone que en los condritos está contenida la composición de la nebulosa solar. Todo el material terrestre estaba fundido, y durante el enfriamiento la cristalización fraccionada determinó la formación de rocas muy distintas en su composición química. Esto ha supuesto una importante base experimental para la cosmogonía, esto es, para la ciencia que se, pregunta por el origen del mundo.

Los meteoritos diferenciados también muestran un fraccionamiento químico bastante avanzado. Entre ellos existen objetos compuestos casi exclusivamente de níquel-hierro y objetos compuestos de silicatos que, de forma similar a los basaltos terrestres, se han formado en el curso de procesos de fusión parcial.

Así pues, tiene un gran interés el estudio del origen de los meteoritos. Los estudios petrológicos y metalográficos indican que deben proceder de las capas superiores de los planetas o de los asteroides, donde también se han enfriado. La profundidad a que ha ocurrido esto se deduce habitualmente estableciendo una comparación con las estructuras terrestres: el mismo proceso se verifica en las rocas volcánicas cristalizadas en corrientes superficiales. Por otra parte, todos los minerales contenidos en los meteoritos se han formado en un marco de grandes presiones.

El origen de los meteoritos pétreos se puede deducir a partir del contenido de gas del viento solar. Los iones de este viento

tienen energías muy bajas y penetran muy poco en el material (100 Å). Por tanto, sólo se encuentran en los fragmentos de piedra que han estado cerca de la superficie de rocas de mayor tamaño. Pero en los choques con otras rocas el material de la superficie puede llegar también al interior de la masa de piedra. Este tipo de rocas ha sido encontrado en la Luna, circunstancia que ha permitido reconstruir su historia. Por consiguiente, los meteoritos ricos en gas han debido formarse en la regolita (esto es. la capa de polvo de la superficie lunar). La comparación con la Luna se realiza del modo que se expone a continuación.

El contenido de gas solar en la masa mineral de un cuerpo depende de dos parámetros: la corriente de viento solar, que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia respecto del Sol, y la permanencia media en la superficie. Esta última es aproximadamente proporcional al valor inverso de la «tasa de cráteres», es decir, a la frecuencia con la que las piedras llegan a la superficie. Estableciendo una comparación con las rocas lunares se puede determinar (con bastante seguridad) la distancia del Sol a la que se ha mantenido el cuerpo estudiado. Como «gases de contraste» se utilizan ante todo el neón y el xenón, gases nobles que no reaccionan con el material meteórico y apenas se difunden. En la figura 7-3 se presenta el contenido de neón hallado en los meteoritos y en las rocas lunares en relación con el tiempo de exposición de la roca a la radiación cósmica galáctica. Esta radiación llega por todos lados, es muy rica en energía y, por tanto, puede penetrar mucho en la materia. El tiempo de exposición se calcula determinando la frecuencia relativa de isótopos de determinados elementos. Las líneas oblicuas dibujadas en el diagrama corresponden a las distancias 1 UA (la órbita de la Luna) y 10 UA. Se observa que los meteoritos se han tenido que mantener entre ambas en algún punto, probablemente entre 2 y 4 UA, que es la distancia en la cual situamos el cinturón de asteroides (2,5 UA).

Desde el descubrimiento de los asteroides hasta finales de los años sesenta de nuestro siglo, los científicos interesados por los cuerpos celestes «más pequeños» se ocuparon de buscar nuevos objetos y de determinar los elementos orbitales de los 2.297 asteroides conocidos por entonces; hoy todos ellos tienen

nombre y están numerados. A partir de los primeros años setenta, nuestros conocimientos sobre los asteroides comenzaron a aumentar gracias a la aplicación de nuevos métodos de medición.

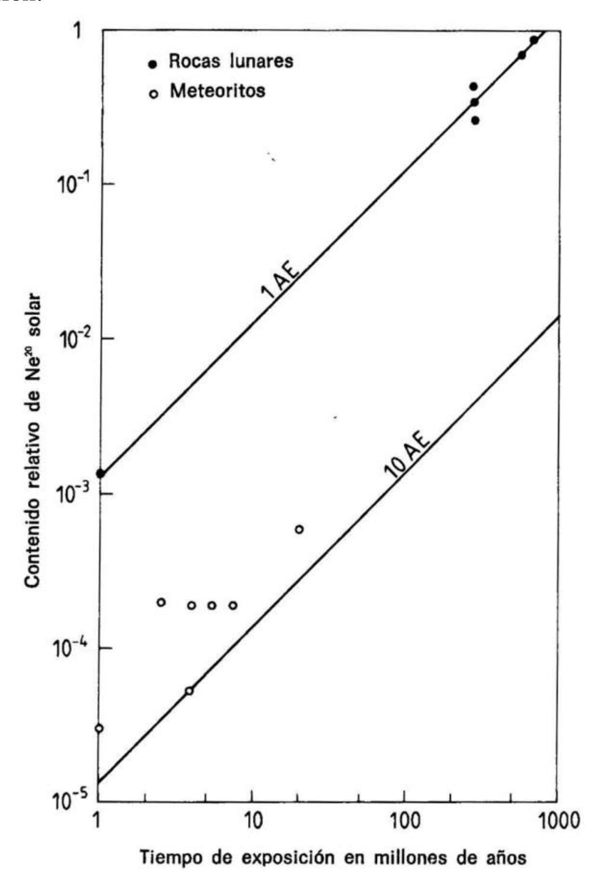


Fig. 7-3. Relación entre el contenido de gas solar (del viento solar) y el tiempo de exposición como función de la distancia del Sol. Las rocas lunares tienen, por lo general, un mayor contenido de gas que los meteoritos. En consecuencia, éstos deben haberse mantenido preferentemente en una región en la que la corriente del viento solar era menor, y por tanto se hallaba a mayor distancia, probablemente entre 10 y 2.5 UA.

Al ordenar los asteroides por su distancia media con respecto al Sol se obtiene la distribución representada en la figura 7-4.

Los grandes descensos en las resonancias principales indican lo fuerte que es la influencia de Júpiter sobre los asteroides. Las zonas afectadas reciben el nombre de lagunas de Kirwood. En los últimos años se han conocido interesantes detalles acerca de algunos grupos de asteroides.

(a) Los «Troyanos », que son 21, se encuentran en los puntos de Lagrange de Júpiter (así pues, en la órbita de este planeta)
(b) Los 27 «Hildas» están cerca de la resonancia 2/3 a 3,96 UA.
(c) Los «Húngaros» (16) tienen órbitas muy inclinadas cerca de la resonancia 1/4 a 3,5 UA.
(d) Las órbitas de los objetos Apolo-Amor (aproximadamente 700, de los que se conoce la órbita de 48 de ellos) cruzan las de Marte o la Tierra.

Sólo (a), (b) y (c) podrían haberse formado en su localización actual. Los objetos Apolo-Amor han tenido que recibir «refuerzos» del cinturón principal o de las «reservas de cometas». Los asteroides «Hirayama» pueden ser considerados (debido a la similitud de sus elementos orbitales) como los restos, del choque entre dos cuerpos de mayor tamaño. Sin embargo los choques no tienen que provocar necesariamente la destrucción de los objetos. Además, los asteroides también pueden chocar entre sí, formándose polvo y piedras de distintos tamaños que salen lanzados con fuerza. Esto podría explicar el origen de una parte de la materia interplanetaria observada. Es muy probable que de ahí procedan los meteoritos más diferenciados del cinturón de asteroides, En cambio, a los cometas se les considera más bien como fuente de meteoritos condríticos.

El asteroide «Héctor», elemento n.º 624 del grupo de los Troyanos, ha llamado la atención recientemente por un hecho curioso: al igual que Japeto, una luna de Saturno, presenta un hemisferio más claro y otro más oscuro. Por otra parte, tiene una forma más bien alargada: su mayor diámetro (300 km

aprox.) es tres veces más grande que el menor. Estos dos hechos son extraordinarios y han inducido a dos astrónomos norteamericanos (H. Hartmann y D. P. Cruikshank) a sustentar la idea de que Héctor podría haber surgido del «suave» choque entre dos objetos del mismo tamaño aproximadamente. De hecho, las velocidades relativas del grupo de los Troyanos son, con 1-2 km/seg, inferiores a las de otros grupos de asteroides. Hoy se piensa que éste pudo haber sido también el origen de los planetas exteriores.

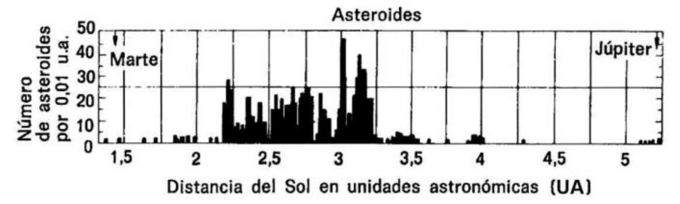


Fig. 7-4. Número de asteroides en relación con la distancia con respecto al Sol. Los grandes descensos de la frecuencia entre 2,2 y 3,2 UA reciben el nombre de «lagunas de Kirkwood». Se relacionan con las resonancias gravitacionales de Júpiter.

El asteroide Pallas, de 550 km de diámetro, tiene posiblemente una luna de 175 km de diámetro, que gira alrededor de él a una distancia de 750 ± 100 km. Es probable que también posea una luna el asteroide «Victoria».

7.2. LOS COMETAS

Los cometas son cuerpos pequeños que generalmente tienen pocos kilómetros de diámetro. La figura 7-5 muestra esquemáticamente un cometa en las proximidades del Sol. Cuando se encuentra a gran distancia de este último, el cometa está inactivo. Su pequeño núcleo sólo refleja la luz; éste es el motivo por el que los cometas se suelen ver relativamente tarde. En las proximidades del Sol, el núcleo (que entonces no se puede distinguir) se halla rodeado de una «cabeza», la coma (fig. 7-6), cuyo radio puede medir 10^4 km e incluso más. La coma se compone de gas, surgido del núcleo por sublimación,

y de polvo; su producción aumenta drásticamente a medida que disminuye la distancia con respecto al Sol. El polvo es acelerado por la presión de radiación solar, y de este modo se forma en el plano de la órbita una cola de polvo sin estructura, curvada, que sale del cometa. La «cola de plasma» (muy estructurada), que sigue una dirección radial con respecto al Sol y puede ser visible en una longitud de más de 100 millones de kilómetros, condujo en 1952 al astrofísico alemán Ludwig Biermann a la suposición de que del Sol fluía continuamente plasma. Este «viento solar», que posteriormente se midió directamente y hoy se sigue estudiando con intensidad, es responsable de la cola de plasma de los cometas.

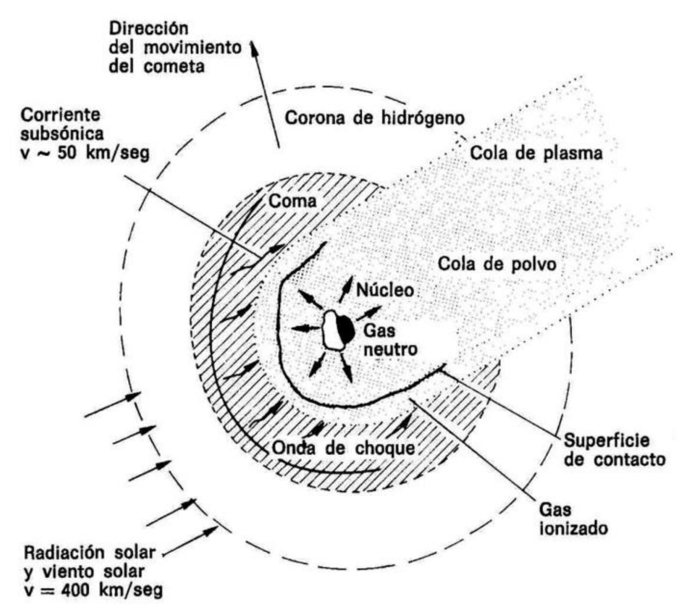


Fig. 7-5. Esquema de la estructura de un cometa en las proximidades del Sol. El cometa se mueve casi perpendicularmente a la dirección cometa-Sol. La línea de trazos indica la gigantesca corona de hidrógeno que se desarrolla alrededor del cometa. Rodeando al núcleo está la coma, probablemente una onda de choque. La cola de plasma sigue una dirección radial con respecto al Sol, mientras que la de polvo está curvada.

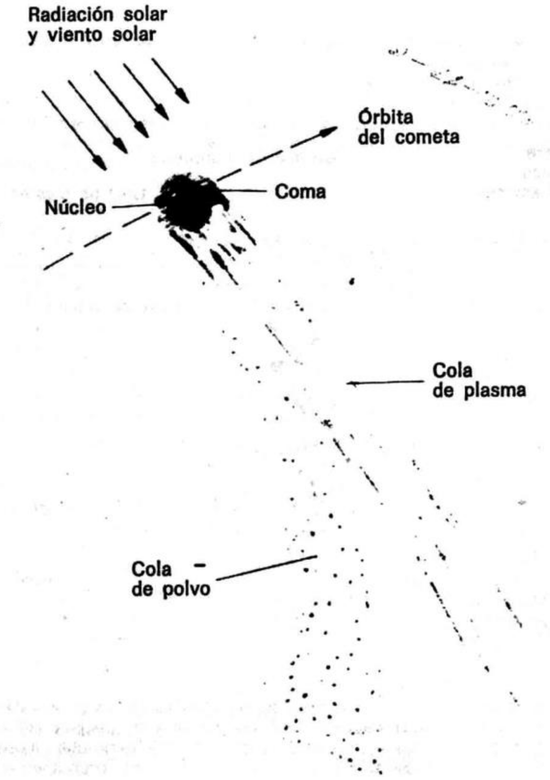


Fig. 7-6. Esquema en detalle de un cometa en las proximidades del Sol

Durante mucho tiempo se ha relacionado la aparición de los cometas con todo tipo de infortunios. Así, Aristóteles y Tolomeo los consideraron «seres malignos». Para muchos, la aparición del cometa de Halley en el año 12 a.C. anunció en Roma la muerte de Agripa, en tanto que su presencia en el 66 d.C. se interpretó como un aviso de la inminente destrucción de Jerusalén. En el año 1066 los ingleses pensaron que este cometa supondría un peligro para su rey, Harold (que moriría en Hastings). El Halley se pudo ver cuando Aecio venció en el año 451 a Atila, rey de los hunos, y cuando los turcos sitiaron Belgrado en 1456. En 1910 la Tierra cruzó la cola del cometa, lo

que dio lugar a numerosas especulaciones y temores. La primera observación del Halley se realizó en el año 467 a.C. en China.

Los cometas se designan con una letra siguiendo el orden de su aparición en un determinado año: por ejemplo, 1979b. Cuando se trata de cometas recién descubiertos, se antepone el nombre de su descubridor. Se registran en el Instituto Astronómico de la Universidad de Cambridge/Massachusetts y su denominación definitiva sigue el orden de su paso por el perihelio con cifras romanas: 1973 XII fue, por ejemplo, el cometa Kohoŭtek.

Hasta el momento se han observado unos 700 cometas diferentes; cada año se descubren hasta 10 nuevos. Existen cuatro grupos de cometas clasificados en función de sus órbitas. Los de período corto, que son unos 80, muestran períodos de 3-25 años; los más conocidos son los cometas de Encke (período de 3,3 años, observado en 52 ocasiones) y Tempel 2 (período de 5,3 años, observado 16 veces). Sus órbitas están casi en el plano de la eclíptica. Los cometas de período corto son considerados cómo «viejos», pues debido a sus repetidas aproximaciones al Sol han perdido mucho material, sobre todo gases fácilmente volátiles. Su superficie debería de estar muy enriquecida con fragmentos de polvo de gran tamaño. Su destino podría ser convertirse en asteroides, sin mostrar, por tanto, variaciones de actividad; éste será quizás el caso de Chiron, que se mueve entre Saturno y Urano, Hidalgo, Thule, y probablemente también el de algunos «troyanos» y los objetos Apolo y Amor. Se sabe que, a lo sumo, pueden convertirse en asteroides el 5% de los cometas de período corto. La mayoría de los cometas se descomponen en gas y polvo, como se comprobó hace algunos años con el cometa West, que se desintegró en muchos fragmentos.

En el grupo de los períodos medios (de 25 a 200 años) se incluyen 20 cometas, el más conocido de los cuales es el cometa Halley (período de 76 años). Las órbitas de los cometas de este grupo muestran una mayor inclinación con respecto a la eclíptica. El grupo más numeroso es el de los cometas de

período largo (de 200 a 1 millón de años), cuyos afelios alcanzan hasta 10.000 UA. En sus órbitas se observan casi todas las inclinaciones.

El cuarto grupo, con órbitas cuasiparabólicas (80 observaciones), comprende los cometas cuyos afelios origínales (antes de que fueran desviados hacia el Sistema Solar) se encontraban a 50.000 UA de distancia del Sol. Dado que esto no puede deberse a la casualidad, se piensa que existe una «nube de cometas» (nube de Oort/Öpik) simétrica al Sol, que se mueve con el sistema solar y de la que en ocasiones llega un cometa al interior de éste en virtud de alteraciones de la órbita provocadas por las estrellas. Curiosamente, los núcleos de estos cometas «nuevos» suelen tener pocos kilómetros de diámetro. Esto hace que a menudo se les identifique con aquellos cuerpos para los que se presupone tal diámetro en las teorías de la inestabilidad gravitacional de la nebulosa solar. Se piensa que los núcleos de los cometas son los cuerpos más antiguos del Sistema Solar y que podrían constituir también el material de los planetas exteriores Urano y Neptuno.

La masa de un cometa parece situarse entre 10^{15} y 10^{18} g. La fuerza de gravitación es pequeña ($\sim10^{-4}$ de la aceleración de la gravedad terrestre) y como sea que la velocidad de escape no suele rebasar los 5 m/s, los gases se alejan fácilmente del cometa. Al aproximarse al Sol, éste cambia rápidamente, pues el calentamiento de su superficie hace que comience la sublimación: primero CO_2 a unas 3 UA de distancia del Sol, luego agua, a partir de 1,5 UA Los gases que se subliman abandonan la superficie aproximadamente a la velocidad del sonido, de acuerdo con la temperatura. El gas se expande radialmente hacia todos los lados y forma la atmósfera del cometa, denominada «coma». Las moléculas sublimadas se ionizan y disocian en la luz del Sol, proceso al que no es ajeno el choque con las partículas del viento solar. Más allá de unos 1.000 km por encima del núcleo, las moléculas sublimadas se descomponen en radicales libres o átomos (fig. 7-6).

El hidrógeno formado en la coma por fotodisociación (en la energía liberada se dividen los fragmentos) inicia en seguida un intercambio de carga con los iones hidrógeno (protones del

viento solar cuya energía es de 1 k*e*V aproximadamente). De este modo se forman en la coma átomos de hidrógeno neutros relativamente rápidos y protones lentos. Los átomos de hidrógeno que se marchan, se ionizan en parte de nuevo a gran distancia del cometa. Esto determina la formación de una gigantesca corona de hidrógeno, que es uno de los objetos más grandes que podemos observar en el cielo (en la línea alfa de la serie de Lyman del espectro del hidrógeno).



Fig. 7-7. El cometa Kohoŭtek.

La interacción entre el viento solar y el cometa es un proceso del plasma sumamente complejo en el que también desempeña un papel importante el campo magnético interplanetario. Aproximadamente a un millón de kilómetros delante del cometa se forma una onda de choque de aproximadamente 10^5 km de profundidad. Se forma debido a la interacción entre el viento solar y el «obstáculo»: se produce el calentamiento del plasma y la aceleración de las partículas cargadas. El gas que escapa es ionizado por la luz y, debido a las colisiones con las partículas que forman el viento solar, «llena» entonces el campo magnético arrastrado por el viento, es decir, es acele-

rado y «recarga» de este modo el campo magnético interplanetario. Gracias a esto, el viento se ve frenado, formándose una «barrera magnética» de aproximadamente 60 nT a 100.000 km delante del cometa. A una distancia de 4.700 km se localizó la «superficie de contacto», que corresponde aproximadamente a la ionopausa de un planeta, fuera de la cual el viento solar resbala a lo largo de esta superficie variable en forma de paraboloide de rotación. En el interior de dicha superficie se forman corrientes cuyos campos mantienen en equilibrio la presión exterior junto con la presión interior del gas. En el interior de esta atmósfera se verifican una serie de reacciones químicas, gracias a las cuales se forman, a partir de las «moléculas madres» evaporadas del núcleo cometario, múltiples moléculas derivadas, incluso complejas. Esto permitió que se detectase un 80% de H_2O, un 10% de CO, un 2% de CH_4, un 1,5% de CO_2 y un 2% de N_2, así como formaldehído y ácido cianhídrico.

El núcleo del cometa Halley es negro, tiene una longitud aproximada de 15 km, presenta forma de cacahuete y tiene un grosor de unos 8 km. Hay que abandonar la concepción anterior, según la cual el núcleo estaba formado por una mezcla de polvo y hielo, es decir, era una especie de «bola de nieve sucia». El núcleo está formado por silicatos, rodeados por un envoltorio negro, posiblemente carbono polimerizado. Su densidad está comprendida entre 0,2 y 0,5 g/cm^3, es decir, presenta muchas cavidades huecas. La luz solar calienta, al parecer, su superficie, que le confiere un buen aislamiento, hasta unos 100°C. En estas zonas el hielo se evapora de forma explosiva arrancando polvo; de este modo es como se forman los «jets» («chorros») proyectados hacia el Sol. Estos chorros son desviados y forman la cola de polvo del cometa (fig. 7-6). Los granos de polvo tienen masas comprendidas entre 10^{-10} y 10^{-16} g. Existen diversos motivos que hacen plausible la hipótesis de que el núcleo esté constituido por una matriz de silicatos, que contiene un material líquido más ligero, es decir, que tenga una cierta similitud con los arrecifes de coral.

Los enjambres de meteoritos que observamos con periodicidad anual se deben a que la Tierra atraviesa las estelas de

polvo que dejan a su paso los cometas. Algunas de ellas se pueden asignar directamente a ciertos cometas. Las nubes luminosas nocturnas observadas en ocasiones en la alta atmósfera se relacionan con la evaporación de material cometario, ya que los iones metálicos que se observan en ellas (Ca, Al, K, Si, Fe, Mg) presentan frecuencias relativas comparables a las de los meteoritos condríticos.

También se puede suponer que el material cometario represente granos de origen presolar, formados, por ejemplo, durante explosiones de supernovas. Además, en el material de los cometas se encuentran moléculas como las que se detectan en las nubes o nebulosas interestelares. La formación de moléculas en los cometas es una consecuencia natural del calentamiento de su superficie. Con la formación de la atmósfera de la coma mediante sublimación, la fotodisociación y la ionización dan lugar además a la descomposición de las «moléculas primigenias» sublimadas directamente. Gracias a la colisión con otras moléculas e iones se producen entonces reacciones químicas de gran complejidad que causan la formación de nuevos complejos moleculares, en parte muy estables, entre ellos una serie de moléculas orgánicas (v. tabla 7-1). Gracias al empleo de métodos radioastronómicos se han conseguido detectar HCN, CH_3CN y H_2O, que se supone que son «moléculas primigenias» (es decir, moléculas que se han sublimado directamente).

Tabla 7-1. Elementos constituyentes observados en la atmósfera de los cometas

Materia inorgánica	H, H_2O, O, OH, NH, NH_2, N_2^+, OH^+, H_2O^+, NH^+ (en las proximidades del Sol: Na, Ca, Cr, Co, Mn, Fe, Ni, Cu, V)
Materia orgánica	C, C_2, C_3, CH, CN, CO, CH_3CN, HCN, CS, CH^+, CO^+, CO_2

Comprobados mediante métodos ópticos en la luz visible ultravioleta e infrarroja así como por medio de observaciones radioastronómicas.

A éstas cabe añadir también el CO_2. Los métodos ópticos abarcan evidentemente sólo átomos, moléculas e iones procedentes de las capas más externas de la atmósfera del cometa.

Naturalmente, sólo para los cometas «nuevos» como tales, que acceden por primera vez al interior del Sistema Solar, tenemos la «garantía» de que están formados por un material que presenta una superficie que no ha experimentado modificaciones. Estos cometas son muy fríos; a partir de la luminosidad observada se pueden determinar, cuando se considera un determinado modelo, la temperatura que reina en la superficie de un cometa (en tanto en cuanto se encuentra a gran distancia del Sol). De este modo se han deducido para los «nuevos» cometas temperaturas superficiales típicas de 110°K. En el interior de los cometas las temperaturas deberían de ser incluso inferiores.

Desde el paso de la sonda interplanetaria ISEE-3 a través de la cola del cometa Encke y los pasos de las sondas espaciales Vega-l y Vega-2, Sakigake, Suisei, Planet-A y Giotto junto al cometa Halley, se ha dado respuesta a muchos interrogantes. Gracias al análisis del polvo. Mediante técnicas de espectroscopía de masas, fue posible identificar las moléculas presentes en la atmósfera cometaria y determinar sus -abundancias. Además de muchas otras conclusiones derivadas de este conocimiento detallado, mencionaremos aquí únicamente las referidas a la formación del cometa. Las mediciones dieron como resultado que las relaciones de abundancias de carbono y oxígeno respecto del silicio equivalen aproximadamente a las del Sol. Por el contrario, el nitrógeno es notablemente más raro, si bien más frecuente que en ciertos meteoritos (condritas carbónicas). Las mediciones llevadas a cabo por la sonda Giotto dieron como resultado que este déficit de nitrógeno se puede detectar tanto en el gas como en el polvo eyectado. En cuanto a la formación del cometa, esto significa que el carbono y el oxígeno están contenidos condensados en el núcleo cometario en forma de H_2O, CO_2 y CO, pero que, sin embargo, el nitrógeno no se condensó como N_2 (con mayor frecuencia como NH_2), sino que pudo escapar en forma gaseosa. Esto indica que la temperatura de la región en la que se formaron los cometas estaba por encima de la temperatura de condensación del N_2.

Dado que para una clase de partículas de polvo presentes en la atmósfera terrestre no cabe duda de su origen cometario, se puede deducir de su contenido en metano y sus correlaciones

isotópicas que se trata de granos de polvo procedente de la nebulosa presolar, que suponen, por lo tanto, un componente importante del núcleo de un cometa. La rápida desintegración observada de los granos de mayor tamaño en el cometa Halley, después de haber sido irradiados durante un cierto tiempo por el Sol, confirma en cierto modo la sospecha de que los cometas se formaron a gran distancia del Sol y a temperaturas relativamente bajas (Nube de Oort) hace 4.600 millones de años.

Sin embargo, sería posible encontrar respuestas sorprendentes incluso para un campo aparentemente tan alejado como el del origen de la vida. Diferentes autores han expuesto la posibilidad de que durante la fase T-Tauri del Sol (las estrellas sufren una evolución explicada en el capítulo IX. cuyos estados característicos se han bautizado con diferentes nombres) pudiese haber existido un viento solar mucho más intenso, tan intenso que podría haber arrastrado las atmósferas-de los planetas terrestres. Estás podrían haberse formado con posterioridad nuevamente a partir de material cometario.

7.3. GAS Y POLVO EN EL SISTEMA SOLAR

Después de la puesta del Sol y en el lugar donde la eclíptica esto es, el plano definido por la órbita terrestre) corta el plano del horizonte, con buenas condiciones de visibilidad se puede observar un resplandor de forma triangular simétrico a la eclíptica. Otro tanto sucede antes de la salida del Sol en el este. Semejante fenómeno luminoso recibe el nombre de «luz zodiacal» y donde mejor se observa es en los trópicos. Fue descubierta- en 1683 por J. D. Cassini y N. Fatio. En el punto de la esfera celeste opuesto al Sol se aprecia también un débil fenómeno luminoso al que se denomina «Gegenschein» o luz antisolar. Este resplandor se explica por la dispersión de la luz en las pequeñas partículas de polvo interplanetario. La polarización de esta luz zodiacal constituye un indicio de la existencia de electrones libres. Estas observaciones fueron los primeros pasos hacia la idea, hoy generalmente aceptada de que el espacio interplanetario no está «vacío».

Este fenómeno se explica a través de una nube de polvo interplanetario en forma de disco y muy concentrada en la eclíptica (mediciones realizadas recientemente demuestran la existencia de un plano de simetría con 3º de inclinación con respecto a la eclíptica), cuya densidad espacial es muy reducida: en la órbita terrestre sólo algunas partículas de polvo por km^3. El interés por el polvo del Sistema Solar ha crecido considerablemente desde que se comprobó que en las nubes de polvo se pueden estudiar, directamente *in situ* procesos tan importantes para la astrofísica como el efecto de la presión de radiación sobre las partículas de polvo, la desintegración de estas partículas, sus variaciones térmicas, el impacto de los iones en la superficie del polvo, el ««sputtering» —es decir, la expulsión de átomos por el choque de los iones en la superficie del polvo— y los efectos magnéticos. A partir del estudio de la luz zodiacal se pueden sacar conclusiones sobre partículas de polvo más grandes (micrometeoritos, dimensiones superiores a 10 µm), que son atraídas hacia el interior del Sistema Solar por la fuerza de gravitación del Sol. En las proximidades de éste, la fuerza de gravitación ejerce un efecto contrario a la presión de radiación solar (v. apéndice 2). En las partículas muy pequeñas (por debajo de 1 µm) la presión de radiación prevalece sobre la atracción de la gravitación, con lo que se expulsan del Sistema Solar moléculas (formadas, p. ej., por evaporación en las proximidades del Sol) y pequeñas partículas de polvo. Como se explica en el apéndice 2, las partículas de polvo tienen una vida de a lo sumo algunos millones de años. Esto significa que el polvo del Sistema Solar es todavía «joven».

Con esto se plantea una interesante pregunta: ¿de dónde procede el polvo? En el caso de los meteoritos «recogidos» por la Tierra, que con velocidades relativas entre 11 km/seg (la velocidad orbital de la Tierra) y 72 km/seg (la velocidad de escape del Sistema Solar) dejan rastros luminosos en las capas altas de la atmósfera, se pueden calcular los elementos orbitales. Tras realizar estos cálculos en cientos de meteoritos, se ha comprobado que se mueven en órbitas elípticas alrededor del Sol, por lo que no son de origen interestelar. Por tanto, debemos partir de la base de que la mayor parte del polvo procede

del Sistema Solar. Merced a diversas mediciones realizadas en satélites se sabe que el número de micrometeoritos de radio R disminuye según R^{-4}: así pues, las partículas más pequeñas son mucho más frecuentes que las de mayor tamaño.

El polvo puede proceder del espacio interestelar. Debido al movimiento del Sistema Solar con respecto a su entorno (v. apéndice 1), el polvo interestelar se mueve aparentemente desde una zona limitada hacia el Sistema Solar. En el campo gravitatorio del Sol este polvo se «enfoca», de modo que «detrás» de nuestra estrella (desde el punto de vista de la dirección del movimiento galáctico) se aglomera formando una especie de línea de flujo. Las mediciones realizadas en el Sistema Solar no han podido confirmar este efecto señalado por dos físicos franceses (Blamont y Bertaux), lo que desde la perspectiva actual puede deberse a diversas causas: menor densidad de la supuesta en el polvo interestelar, efecto de la presión de radiación del Sol o carga eléctrica de las partículas de polvo (como consecuencia de la interacción con el viento solar). El polvo hallado en Júpiter sólo se explica por este enfoque gravitacional del polvo procedente del cinturón de asteroides. Por otra parte, las sondas espaciales han demostrado que el cinturón de asteroides apenas contiene «polvo».

Hasta el momento no se han encontrado unas direcciones preferentes del flujo de micrometeoritos en el espacio interplanetario. Por ello se ha fijado el valor de 6×10^{-5} partículas de polvo por m^2 y seg como límite superior del flujo de polvo de origen interestelar para las partículas cuyas masas superan los 10^{-14} g. En la actualidad, el polvo interestelar no es, por tanto, una fuente importante del polvo interplanetario. Pero la situación ha podido ser diferente en otros tiempos, según pasara o no el Sol con sus satélites por una nube de polvo interestelar.

Las mediciones realizadas en la luz zodiacal han permitido comprobar que las principales fuentes del polvo se encuentran incluso dentro de la órbita de Marte y que, además, deben estar concentradas en la eclíptica. El polvo interestelar es, como hemos visto, escaso. Bien es verdad que tampoco se encuentra polvo en la zona del cinturón de asteroides, tal como lo han demostrado las misiones Pioneer 10 y 11, por lo que no se

puede considerar a los asteroides como una fuente importante. Quedan los cometas, que producen también meteoritos. Pero en este terreno abundan las dificultades: los cometas de período corto producen demasiado poco polvo como para explicar la cantidad existente. Quedan los de período largo, pero su producción de polvo no resulta suficiente, ya que la presión de radiación —al menos en teoría— expulsa mucho polvo hacia afuera. En las proximidades de los planetas se han descubierto recientemente dos efectos que se deben a su interacción con los meteoritos. En las cercanías de Júpiter se detectó un aumento de la corriente de polvo, que se ha explicado con el «enfoque» gravitacional (al igual que en el Sol, como hemos mencionado arriba). En las proximidades de la Tierra se han descubierto los denominados «cluster» de polvo, masas compactas formadas por muchas pequeñas partículas sueltas y «aglutinadas» entre sí. Se pudo comprobar, en consecuencia, que el polvo también se forma por la destrucción de partículas de mayor tamaño, merced a la carga eléctrica existente en el campo magnético de un planeta bajo el efecto de fuerzas eléctricas. Así pues, es indudable que son fuentes de polvo interplanetario.

No se conoce demasiado bien la composición química de los micrometeoritos. Sobre la base de determinadas mediciones ópticas (luz dispersa) se han elaborado modelos de meteoritos que, compuestos de carbono y silicio, podrían explicar lo observado. Los condritos con contenido en carbono tienen una composición similar, por lo que como posible fuente no hay que descartar a los asteroides —los que se encuentran en la parte interior del Sistema Solar— dentro de la órbita de Marte, tal y como se ha indicado anteriormente. Pero también hay que tener en cuenta a los cometas. La tasa de producción del cometa Arend-Roland, por ejemplo, es, en el perihelio, de $7{,}5\times10^7$ g/seg; en el cometa Benett se sitúa en 2×10^7 g/seg. A través de mediciones fotométricas realizadas en la cola de polvo de cometas «viejos», como el D’Arrest o el de Encke, se ha comprobado recientemente que este último, por citar un ejemplo, sólo produce 400 g/seg. Si esto es cierto, los cometas no pueden mantener por sí solos la producción de polvo interplanetario. Los estudios realizados en la luz zodiacal han demostrado que

existen dos clases de polvo: uno de partículas gruesas (por encima de 2 µm), probablemente silicatos, que describe órbitas casi circulares alrededor del Sol (cuyas pérdidas son de tan sólo 3×10^4 g/seg), y otro de pequeñas partículas de mayor densidad que describe órbitas hiperbólicas (esto es, que puede abandonar el Sistema Solar). Sólo la primera clase procede del paso de cometas de período corto: bastarían 70 cometas para mantener el equilibrio de polvo. No se conoce ninguna fuente que pueda producir las partículas de polvo más pequeñas.

Con todo ello se llega a la conclusión de que no todos los meteoritos se han formado del mismo modo. Por otro lado, el análisis químico confirma lo que se había deducido indirectamente a partir de otras mediciones: los agregados porosos de partículas amorfas y cristalinas de entre 0,1 y 10 pm y de densidades en torno a 1 tienen probablemente su origen en los cometas. Pero también hay meteoritos cuya composición corresponde a la de los condritos con contenido en carbono. Así pues, se puede explicar la procedencia de una parte del polvo, pero de momento no se conoce ninguna fuente para el resto.

A través de las mediciones astronómicas se sabe que las nubes oscuras de la Vía Láctea se deben a la absorción de la luz de las estrellas por el polvo situado delante. En las proximidades de estrellas muy calientes y luminosas se encuentran unas zonas claras difusas que hay que interpretar como nebulosas de reflexión: esta última se produce en las partículas de polvo. En el caso de los objetos infrarrojos lejanos, que en la luz visible brillan poco, se supone que se trata de estrellas rodeadas de una capa de polvo: dado que la dispersión de la luz depende de la longitud de onda, se puede obtener una curva de debilitamiento de la luz como función de la longitud mencionada. Por efecto del polvo se produce una coloración rojiza de la luz estelar. Así pues, existe polvo en la Vía Láctea y también en otras galaxias. Aunque de momento tampoco se conoce el origen del polvo interestelar: con las densidades reinantes resulta difícil explicar su formación en el espacio interestelar a partir de moléculas en espacios de tiempo cosmológicos (miles de millones de años). Resulta más sencillo que esto ocurra en la atmósfera de estrellas frías (p. ej., gigantes viejas). Dado que

en ellas hay suficiente carbono, se puede pensar en la formación de partículas de polvo químicamente similares a las características del modelo antes mencionado. Durante la formación de las estrellas (condensación), el polvo podría haber sido expulsado del sistema en rotación. Pero esto son sólo hipótesis, por lo que la cuestión queda todavía sin resolver.

El espacio interplanetario no está vacío, como tampoco lo está el espacio interestelar, en el que se halla incluido el Sistema Solar. Ya hemos hablado de los planetas, los planetoides, los cometas y el polvo. Todos ellos son, al igual que el Sol, fuentes de gas, que sale al espacio. El Sol es la fuente más importante. De él se desprende casi continuamente el «viento solar», del que hablaremos con más detalle en el capítulo XIV, dedicado a la «heliosfera». Se trata de un plasma, compuesto de átomos ionizados cargados positivamente, a los que se denomina iones, y de electrones. La mayor parte de este plasma está compuesta de iones hidrógeno, protones. Pero en él se encuentran todos los demás elementos con la misma frecuencia relativa que en el Sol y en los condritos. Una pequeña parte de los átomos puede pasar como gas neutro (rápido) a través de las partes calientes de la atmósfera solar exterior y, de este modo, llegar al espacio interplanetario.

Los planetas pierden gas en sus atmósferas y en el material de su superficie, siempre que los átomos o las moléculas alcancen velocidades que les permitan salir del campo gravitatorio. Pero los planetas también pierden plasma de sus magnetosferas, al menos de sus amplias colas magnetosféricas, en ocasiones en relación con procesos de aceleración que se pueden desarrollar en el interior de esas magnetosferas. En el espacio interplanetario —pero también en las magnetosferas—, las partículas ionizadas intercambian su carga con partículas neutras. De este modo se pueden formar partículas neutras muy rápidas. Este proceso determina que la energía térmica del gas neutro pase al plasma del viento solar, con lo que este plasma se puede calentar.

En las proximidades de la Tierra, el plasma tiene una densidad aproximada de 5 iones/cm^3. La densidad del gas neutro es considerablemente menor. También podemos encontrar

plasma y gas neutro —procedentes de otras fuentes— en el espacio interestelar. Hay que partir de la idea de que allí el gas forma gigantescas nubes muy distantes entre sí. El Sistema Solar se encuentra actualmente en un «agujero» del gas interestelar, en el que la densidad es tan sólo de 0,02-0,04 por cm^3 (en otros lugares puede alcanzar 1 cm^{-3}).

Así pues, debemos considerar también las fuentes exteriores, el gas neutro —de nuevo principalmente hidrógeno—, que en relación con el Sistema Solar se mueve con velocidades relativas de unos 20 km/s y puede penetrar en nuestro Sistema. Ya hemos mencionado antes que, en las proximidades de su perihelio, los meteoritos y los cometas realizan una considerable aportación al gas neutro interplanetario.

VIII. LAS LUNAS DE LOS PLANETAS

Muchas expresiones «románticas» no se habrían pronunciado o escrito si no existiera la Luna: «luna de miel», «luna plateada», etc. Desde tiempos inmemoriales se ha considerado a nuestro satélite como la compañera del cálido Sol, pues ambos nos han parecido siempre igual de grandes, mientras que todas las estrellas son, en cambio, igual de pequeñas. Naturalmente, pueden percibirse en ello significados más profundos. La forma circular casi perfecta de la Luna la convierte además en un objeto estéticamente agradable; pensemos si no en las toscas rocas de las lunas de Marte, en la posibilidad de que diera vueltas a la Tierra más cerca de ella, ofreciendo entonces un aspecto terrible en su inmensidad. Sea como fuere, nos encontramos en una situación ideal y podemos estar satisfechos con este adorno de nuestro planeta.

Nos gustaría saberlo todo acerca de la Luna: sus características y su historia. Porque es indudable que tiene también una historia, ya que se trata, al igual que la Tierra, de un objeto histórico, esto es, de un objeto que tuvo un principio, ha evolucionado y alcanzará, posiblemente, su final. ¿Por qué tiene un planeta lunas? A decir verdad, de momento no podemos dar una respuesta razonable a esta pregunta que tantas veces se plantea.

El número de lunas existentes en el Sistema Solar es muy elevado. En la tabla 8-1 se recogen todas las lunas conocidas hasta el momento (esto es, hasta finales de 1989; de vez en cuando se descubre alguna nueva), así como sus datos más importantes. No conocemos ninguna luna de Mercurio ni de Venus, por lo que hoy podemos decir casi definitivamente que estos dos planetas carecen de satélites. Tampoco se conoce ninguna «luna de una luna». La Tierra es el primer planeta —avanzando desde el interior hacia el exterior del Sistema Solar— que tiene un satélite. Marte, nuestro vecino hacia el exterior,

cuenta con dos lunas. A partir de ahí comienza a aumentar el número: 15 lunas rodean a Júpiter, 15 giran también en tomo a Saturno, 15 se observan en Urano, 8 en Neptuno, y hace algunos años se descubrió la existencia de una luna en Plutón.

Como veremos más adelante, las lunas pueden haber llegado de tres modos al lugar en que actualmente se encuentran: pueden haberse formado allí, esto es, haberse condensado durante la formación del planeta a partir de la nebulosa solar: pueden haberse desprendido del planeta a lo largo de su evolución, o pueden haber sido «capturadas». Esto último quiere decir que, por ejemplo, un asteroide se halla en condiciones de entrar en el campo gravitatorio de un planeta y mantenerse en una órbita estable.

Las lunas que se mueven alrededor de un planeta están sometidas a diversas fuerzas. Si los planetas fueran esferas perfectas, las lunas se moverían en órbitas elípticas. Pero, debido a su propia rotación, los planetas están achatados, esto es, muestran un abombamiento ecuatorial. El Sol también desempeña un papel, el mismo que las otras lunas —cuando existen en el mismo planeta—, y tampoco hay que olvidar la influencia (generalmente pequeña) de los demás planetas. El efecto conjunto de estas fuerzas varía en función de la situación del planeta y de la distancia del satélite. En términos generales, sin embargo, se puede atribuir al achatamiento el movimiento de la luna en el plano de su órbita y la precesión de la perpendicular de la órbita alrededor del polo del planeta. Cuanto más cerca esté la luna de éste, más rápida será su precesión. Como consecuencia del achatamiento de la Tierra, el Sol también ejerce un efecto similar sobre ella, actuando en torno a los polos de la órbita, La influencia de ambos efectos determina un complejo movimiento: se habla entonces de las «perturbaciones» de la órbita periódica de una luna. A partir del conocimiento de estas perturbaciones es posible hacer ciertas afirmaciones sobre la distribución de las masas en el planeta o en la luna (momento de inercia). Una importante consecuencia de la influencia mutua de los satélites en el campo de gravitación de un planeta son las «resonancias de la órbita»: los períodos de revolución

de las lunas mantienen entre sí una proporción de números enteros (p. ej., 2:1, 3:2).

Hay que partir de la base de que todo cuerpo celeste ha sido dotado en su origen de un impulso de giro («spin»): gira de un modo adecuado. La cuestión es: ¿han tenido las lunas siempre el eje de rotación que poseen hoy? En caso de que éste haya cambiado, esto es, de que las lunas hayan perdido energía, ¿qué ha ocurrido con esa energía? Como es natural, a las lunas se les puede aplicar también todo lo que resulta válido para los planetas y lo que se ha averiguado sobre ellos. Urano es el único planeta cuyo eje de rotación se halla en el plano de la órbita. No obstante, hoy se piensa que su frecuencia de rotación no ha cambiado nunca. Por otro lado, Venus tiene un período de rotación casi igual a su periodo de revolución, y por lo que parece el «spin» ha cambiado considerablemente desde su origen.

En el caso de una luna hay que partir de la idea de que intenta adoptar, con respecto al planeta, una «configuración de mínima energía», a la que se adapta también su impulso de giro. La pérdida de energía se produce en el curso de una acción recíproca entre luna y planeta. Al ceder este proceso de pérdida de energía (para la luna), el satélite se encontraría en un estado de suave rotación en torno a su «eje de inercia» (en torno al cual tiene su máximo momento de inercia, esto es, su máxima energía de rotación, «girando» de un modo más estable). Pero la luna pierde también impulso de giro en su órbita («acoplamiento del spin y la órbita»). El campo de gravitación del planeta deforma a la luna convirtiéndola en una especie de «cigarro» que señala hacia el planeta, y el satélite adopta esta configuración en mayor o menor medida según su elasticidad. Si el período de rotación de una luna difiere mucho de su período de revolución, el satélite será fuertemente «castigado» por estos cambios continuos de forma, que corresponden a las mareas del mar. Con ello se produce calor y se pierde energía del movimiento de rotación. Si la luna describe una órbita circular y los impulsos de rotación y revolución son vectores paralelos, la transferencia del impulso de giro se mantiene hasta que se igualan los períodos de rotación y revolución: el satélite muestra entonces siempre la misma cara, circunstancia o fenómeno

semejante que ocurre con nuestra Luna que ha llegado ya al final de su proceso evolutivo y ya no se calienta por el «efecto de marea» (como se denomina este mecanismo productor de energía). La energía térmica que poseía se difunde lentamente hacia su superficie y el satélite se enfría poco a poco. En algunas lunas con una permanente asimetría en torno a su eje de rotación el efecto así provocado, unido al «efecto de marea», puede determinar que el período de rotación no tenga un valor absoluto en números enteros. Mercurio, por ejemplo, muestra una resonancia de 3/2 (también ha llegado al final de su evolución).

En todos los planetas exteriores encontramos resonancias entre lunas próximas. Todas las lunas grandes se hallan relativamente (es decir, si se expresan las distancias en radios del planeta) más cerca del planeta que la Luna de la Tierra (v. tabla 8-1). Por otro lado, todas las lunas se mueven alrededor de los planetas más allá de la órbita sincrónica (la órbita en la que la luna rota «sincrónicamente» con el planeta) y fuera de la denominada órbita de Roche (2,44 × radio del planeta). Dentro de la «órbita de Roche» no puede existir ninguna luna, ya que sería destruida por las mareas. Si un sistema de satélites tiene un determinado período de configuración, las perturbaciones recíprocas muestran también ese mismo período, y por consiguiente se ven intensificadas. Esto determina la aparición de resonancias, y en consecuencia los períodos de revolución mantienen entre sí una proporción de números enteros (2:1, 3:2, etc.). Las lunas de Saturno —Titán e Hiperión— presentan períodos de revolución que muestran una proporción de 3:4. Los períodos de Encelado y Dione, otros satélites de Saturno, guardan una relación de 1:2.

#				Características de la órbita				Dimensiones			Características				Atmósfera		Estructura interna	
	Planeta	Nombre de la luna	Descubierta en el año	Radio medio de la órbita/ km/radio del planeta	Período de revolución (6)	Inclinación (grados) (1)	Excentricidad	Radio (M (7)	Masa (g)	Densidad (g/cm^3)	Período de rotación	Temperatura de la superficie (grados K)	Momento magnético de la Luna ($T \times cm^3$)	Campo Magnético del planeta en la luna/ nT	Composición	Presión en la superficie (bares)	Composición química	Radio del núcleo (km)
1	Tierra	Luna		$3{,}844 \times 10^5$ 60,2	$27{,}3217^d$	18.2-28,6	0,0549	1.737,5	$7{,}35 \times 10^{25}$	3,344 ± 0,0016	$27{,}78^d$	274	$5 \times 10^{'6}$		Ne, Ar, He	2×10^{-14}	Silicatos	400
2	Marte (2)	Fobos (M1)	1.877 Hall	6.660 1,96	$7{,}65^h$	1,02	0,015	9,6/10,7/ 13,5	$9{,}6 \times 10^{18}$	1,9 ± 0,5	$3{,}13^d$						Condritos —	?
3		Deimos (M2)	1877 Hall	22.500 6,64	$30{,}30^h$	1,82	0,00052	5,5/6,0/ 7,5	$2{,}0 \times 10^{.B}$	1,6 ± 0,6	?						Condritos	?
4	Júpiter (3)	Amaltea (J5)	1892 Barnard	185.740 2,59	11^h44^m	0,4	0,003	135/70	$\sim 10^{21}$	3,5 (?)				23.800			Condritos	
5		1978 J2 (J15)	1978 Voyager	$2{,}217 \times 10^5$ 3,105	$16^h11^m21{,}25^s$	1,25		40										
6		Io (JD	1610 Galileo	431.000 6,01	$42^h27^m4^s$	0	0	1.816 ± 5	$8{,}91 \times 10^{25}$	3,55	$13^h33{,}6^m$	110	$\leq 2 \times 10^{19}$	1.900	SO_2, H_2S, S_2O	1×10^{-10}	Azufre Condritos	890
7		Europa (J2)	1610 Galileo	$6{,}86 \times 10^5$ 9,57	$3{,}551^d$	0,5	0	1.563 ± 5	$4{,}87 \times 10^{75}$	3,05	$3{,}546^d$	<125	$\leq 4 \times 10^{18}$	470			Condritos	720
8		Ganimedes (J3)	1610 Galileo	$1{,}094 \times 10^6$ 15,26	$7{,}155^d$	0,2	0,001	2.638 ± 10	$1{,}49 \times 10^{26}$	1,94	$7{,}143^d$	128 (85-145)	$\leq 6 \times 10^{18}$	116	—	—	Núcleo rocoso. Manto de material ligero	1.690
9		Calisto (J4)	1610 Galileo	$1{,}922 \times 10^6$ 26,80	$16{,}689^d$	0,2	0,01	2.410 ± 10	$1{,}074 \times 10^{26}$	1,83	$16{,}67^d$	100	$\leq 1 \times 10^{18}$	30	—	—	Núcleo rocoso. Manto de material ligero	1.500
10		Leda (J13)	1874 Kowal	1.122×10^7 156,4	240^d	26,7	0,146	30-40								Ninguna		
11		Himalia (J6)	1904 Perrine	$1{,}15 \times 10^7$ 160,4	$250{,}6^d$	27,6	0,158	60								Ninguna		
12		Elara (J7)	1904 Perrine	$1{,}175 \times 10^7$ 163,8	$259{,}8^d$	24,8	0,207	20								Ninguna		
13		Lisitea (J10)	1938 Nicholson	$1{,}175 \times 10^7$ 163,8	260^d	29	0,130	10								Ninguna		
14		Ananke (J12)	1951 Nicholson	$2{,}10 \times 10^7$ 292,8	625^d (R)	147	0,17	10								Ninguna		
15		Carme (J11)	1938 Nicholson	$2{,}25 \times 10^7$ 313,7	696^d (R)	164	0,21	12								Ninguna		
16		Pasifae (J8)	1908 Melotte	$2{,}35 \times 10^7$ 327,7	$738{,}9^d$ (R)	145	0,38	20								Ninguna		
17		Sinope (J9)	1914 Nicholson	$2{,}37 \times 10^7$ 330,5	755^d (R)	153	0,28	11								Ninguna		
18		1978 J1 (J14)	1979 Voyager	129.514 1,80 ± 0.01	7^h8^m	0	0	15-20								Ninguna		
19		Anillo	1979 (10) Voyager	$1{,}23 \times 10^5$ …$1{,}298 \times 10^5$ 1,72 R_1 …1,81 R_1				Grueso <30 km ~ 2 µm partículas								Halo 2×10^4 km grueso 3×10^4 km ancho	Polvo fino (4 µm)	

				Características de la órbita				Dimensiones ¡			Características				Atmósfera		Estructura interna	
#	Planeta	Nombre de la luna	Descubierta en el año	Radio medio de la órbita/ km/radio del planeta	Período de revolución (6)	Período de rotación	Temperatura de la superficie (grados K)	Composición química	Composición química	Temperatura de la superficie (grados K)	Período de rotación	Tempera-tura de la superficie (grados K)	Momento magnético de la luna ($T \times cm^3$)	Campo magnético del planeta en la luna/ nT	Composición	Presión en la superficie (bares)	Composición química	Radio del núcleo (km)
20	Saturno (4)	Atlas (S17)	1980 Voyager 1	1.373×10^5 2.276	14^h26^m 45^s	0,3	0,002	15			Satélite pastor del anillo A				Ninguna			
21		1980S14 S16	1980 Voyager 1	1.394×10^5 2.311	14^h42^m 45^s	0,0	0,003	50			Satélite pastor del anillo F				Ninguna			
22		1980S26 S15	1980 Voyager 1	$1,417 \times 10^5$ 2,349	$15^h5^m6^s$	0,05	0,004	40			Satélite pastor del anillo F				Ninguna			
23		Jano (8) (S10)	1980 Voyager 1	1.51422×10^5 2,510	16^h39^m 50^s	0,34	0,009	110 × 95 × 80			Lunas co-orbitales				Ninguna			
24		Epitemo (8) (Sil)	1980 Voyager 1	$1,51472 \times 10^5$ 2,511	16^h40^m 19^s	0,14	0,007	60							Ninguna			
25		Mimas (S1)	1789 Herschel	$1,862 \times 10^5$ 3,086	22^h36^m 29^s	1,5 —	0,0201	195 ± 5	$3,7 \times 10^{22}$	1,2 ± +0,1					Ninguna		Silicatos. Hielo	90
26		Encélado (S 2)	1789 Herschel	2.382×10^5 3.948	$1,37^d$	0	0,0044	250 ± 10	$8,4 \times 10^{22}$	1,1 ±0,6					Ninguna		Silicatos. Hielo	
27		Tetis (S3)	1684 Cassini	2.948×10^5 4,886	$1,888^d$	1,1	0	525 ± 10	6.2×10^{23}	1.0 ±0,1					Ninguna		Agua helada	170
28		Telesto (S13)	1980 Voyager 1	$2,944 \times 10^5$ 4,88				12										
29		Calipso (S14)	1980 Voyager 1	$2,944 \times 10^5$ 4,88				6										
30		Dione (S4)	1684 Cassini	3.777×10^5 6,261	2.737^d	0	0,0022	560 ± 10	$1,16 \times 10^{24}$	1,4+ 0.1					Ninguna		Silicatos. Hielo	300
31		1980S12 (S12)	1980 Voyager 1	$3,7806 \times 10^5$ 6,267		0,15									Ninguna			
32		Rea (S5)	1672 Cassini	5.275×10^5 8.744	4.518^d	0,4	0,001	760 ± 10	$2,50 \times 10^{24}$	1.33 + 0,1		99		Albedo 60%	Ninguna		Silicatos. Hielo	390
33		Titán (S6)	1655 Huygens	1.222×10^6 20,26	15.945^d	0,3	0,029	2.575 ± 2	1.345×10^{26}	1,9 + 0,06	$15,87^d$	94 ± 2			CH_4, N_2, C_2H_6	1,5	Silicatos. Hielo	700
34		Hiperión (S 7)	1948/Bond Lassell	1.481×10^6 24.55	$21,277^d$	0,4	0,1042	205 × 130 × 110		—	$21,3^d$				Ninguna			
35		Japeto (S8)	1671 Cassini	$3,563 \times 10^6$ 59,06	79.331^d	14,7	0,0283	720 ± 10	$2,8 \times 10^{24}$	1.1 ± 0,1				Albedo <5%	Ninguna		Hielo	
36		Febe (S9)	1898 Pickering	$1,295 \times 10^7$ 214,71	$550,45^a$ (R)	150	0,1633	110 ± 10							Ninguna			
37		Anillo (DCBAFGE) Gran cantidad de estructuras	1610 Galileo 1655 Huygens	$6,697 \times 10^4$ ...$4,83 \times 10^5$ 1,11 Rs... ...8,0 R_S (E: 3...8, Max: 4 R_S)		~ 0	~ 0 F: 0,0026	Grosor: ABC: ≤ 200m EFG: 10^2-10^3 km Anchura: E: 3×10^5 G: ~ 10^3	$6,2 \times 10^{-6} M_S$	A, B: (11) 100-200 g/cm²		A, B: 56 K C: 85 K		Albedo < 0,8 C: 0,2...0,3 B: < 0,34 E: < 0,05	H_2	~ 600 • cm^{-3}	C: Silicatos	

				Características de la órbita				Dimensiones			Características				Atmósfera		Estructura interna	
#	Planeta	Nombre de la luna	Descubierta en el año	Radio medio de la órbita/ km/radio del planeta	Período de revolución (6)	Incli- Nación (grados) (1)	Excentri- cidad	Radio km (7)	Masa (g))	Densidad (g/cm³)	Período de rotación	Tempera- tura de la superficie (grados K)	Momento magnético de la luna (T × cm³)	Campo magnético del planeta en la luna/ nT	Composición	Presión en la superficie (bares)	Composición química	Radio del núcleo (km)
								F: 30-500 km Material: ABC: 1-10 m Ocasionalmente < #10 km (Anillo F) EFG: 10-100 mim										
38	Urano (5)	1986U7	1986 Voyager 2	$4,97 \times 10^4$ 1,941	$8,0^h$			20			Satélite pastor del anillo C		Albedo < 10%					
39		1986U8	1986 Voyager 2	$5,38 \times 10^4$ 2,102	$9,0^h$			25			Satélite pastor de anillo C		Albedo <10%					
40		1986U9	1986 Voyager 2	$5,92 \times 10^4$ 2,313	$10,4^h$			25					Albedo <10%					
41		1986U3	1986 Voyager 2	$6,18 \times 10^4$ 2,375	$11,1^h$			30					Albedo <10%					
42		1986U6	1986 Voyager 2	$6,27 \times 10^4$ 2,449	$11,4^h$			30					Albedo <10%					
43		1986U2	1986 Voyager 2	$6,46 \times 10^4$ 2,523	$11,8^h$			40					Albedo <10%					
44		1986U1	1986 Voyager 2	$6,61 \times 10^4$ 2,582	$12,3^h$			40					Albedo <10%					
45		1986U4	1986 Voyager 2	6.99×10^4 2,73	$13,4^h$			30					Albedo <10%					
46		1986U5	1986 Voyager 2	7.53×10^4 2.941	$14,9^h$			30					Albedo <10%					
47		1985U1	1985 Voyager 2	$8,60 \times 10^4$ 3,359	$18,3^h$			85 ± 5	$7,49 \times 10^{13}$				Albedo 7%					
48		Miranda (U5)	1848 Kuiper	$1,299 \times 10^5$ 5,074	$33,9^h$	0	<0,01	242 ± 5	$7.494 \pm 2,2 \times 10^{22}$	1,26 ± 0,39			Albedo 24 ± 6%				«Solar Mix» (mezcla solar): 32% roca 53% hielo de agua 7% hielo de amoniaco 8% hidrato de metano	
49		Ariel (U1)	1851 Lassell	$1,909 \times 10^5$ 7,457	$60,5^h$	0	0,028	580 ± 5	$1.35 \pm 0,24 \times 10^{24}$	1,65 ± 0,30			Albedo 31 ± 6%					
50		Umbriel (U2)	1851 Lassell	$2,660 \times 10^5$ 10,391	$99,5^h$	0	0,0035	395 ± 10	$1,274 \pm 0.24 \times 10^{24}$	1,44 ± 0,28			Albedo 19 ± 1%					
51		Titania (U3)	1787 Herschel	$4,363 \times 10^5$ 17,043	$208,9^h$	0	0,0024	805 ± 5	$3,477 \pm 0,18 \times 10^{24}$	1,59 ± 0,09			Albedo 28 ± 2%				40-63% rocas	
52		Oberón (U4)	1787 Herschel	$5,834 \times 10^5$ 22,789	$323,1^h$	0	0,0007	775 ± 10	$2,923 \pm 0,16 \times 10^{24}$	1.50 ± 0,10			Albedo 24 ± 1%				40-63% rocas	

i				Características de la órbita				Dimensiones			Características				Atmósfera		Estructura interna	
	Planeta	Nombre de la luna	Descubierta en el año	Radio medio de la órbita/ km/radio del planeta	Período de revolución (6)	Inclinación (grados) (1)	Excentricidad	Radio (km) (7)	Masa (g)	Densidad (g/cm³)	Periodo de rotación	Temperatura de la superficie (grados K)	Momento magnético de la luna (Txcm³)	Campo magnético del planeta en la luna/ nT	Composición	Presión en la superficie (bares)	Composición química	Radio del núcleo (km)
53		11 Anillos (6, 5, 4, A, β, η, Λ, δ, ε)	1977(9) MiHis, Elliot Dunham 1989(2) Voyager 2	$3{,}7 \times 10^4$... $5{,}116 \times 10^4$ 1,445 R_U 1.998 R_U		0.003… 0.066	$1\text{-}8 \times 10^{-3}$	anchura: 1 -93 km		1,2…26 g/cm² (11)	Albedo 0,01… …0,05					~ 100 cm^{-3}	Polvo condritico	
54	Neptuno (12)	1989N6	1989 Voyager 2	$4{,}82 \times 10^4$ 1,946	7.1ʰ	4°,5	0	27 ± 8						Albedo <2%				
55		1989N5	1989 Voyager 2	$5{,}0 \times 10^4$ 2,010	7.5ʰ	< 1°	0	40 ± 8										
56		1989N3	1989 Voyager 2	5.25×10^4 2,120	8,0ʰ	< 1°	0	75 ± 15						5,4%				
57		1989N4	1989 Voyager 2	6.20×10^4 2.504	10,3ʰ	< 1°	0	90 ± 10										
58		1989N2 (= 1981N1)	1989 Voyager 2	$7{,}36 \times 10^4$ 2,972	13,3ʰ	< 1°	0	95 ± 10						Albedo ~ 5.6%				
59		1989N1	1989 Voyager 2	$1{,}176 \times 10^5$ 4.749	26,9ʰ	< 1°	0	200 ± 1C						6%				
60		Tritón (N1)	1846 Lassell	$3{,}5459 \times 10^5$ 14,33	5.875ᵈ (R)	157	0	1.360	$(2{,}142 \pm 0.007) \times 10^{25}$	2,07 ± 0,02		38 ± 4		Albedo 60-90%	N_2. CH_4 (10^{-4})	1.6×10^{-5}		
61		Nereida (N2)	1848 Kuiper	$5{,}51066 \times 10^6$ 222,65	360,1ᵈ	27,6	0,749	170 ± 25						Albedo ~ 14%				
62		Anillos 1989N3R 1989N2R 1989N4R 1989N1R	1989 Voyager 2 Voyager 2	$4{,}2 \times 10^4$/ 1,696 $5{,}32 \times 10^4$/ 2,15 $5{,}32\text{-}5{,}9 \times 10^{4}$ [11] (2,15...2.4) $6{,}3 \times 10^4$/ 2,544				Anchura: 1.700 <50 15						0,05 Albedo <2% 5,4%	N_2. CH_4 (10^{-4})	1.6×10^{-5}		
63	Plutón	Caronte (P1)	1878 J Christy	19.640 ± 320 17,08	6,39ᵈ	98,8°	0,0001	593 ± 10	$1{,}9 \times 10^{20}$	2,03 ± 0,035	6,39ᵈ	67	¿?		CH_4 + CO (?) + ...	26×10^{-3}	?	?

1. Inclinación con respecto al ecuador del planeta.
2. Datos de las lunas de Marie procedentes de las mediciones de la misión Viking (v. Journal of Geophysical Research 84. vol. B 14, 1979). Los datos se refieren a radios, no a diámetros.
3. Los datos de Júpiter proceden de las mediciones de la misión Voyager (v. Science 206, págs. 925-996,1979).
4. Los datos de Saturno proceden de las mediciones de la sonda Pioneer 11 (v. Science 207, págs. 401-403,1980) y Voyager 1 y 2 (Science 212. págs. 159-243.1981).
5. Las masas de las lunas de Urano se basan en datos fotométricos, según Greenberg. Icarus 24. págs. 325-32.1975
6. (R; significa órbita retrógrada
7. El diámetro de las lunas se determinó en parte con las sondas espaciales (Marte, Júpiter, Saturno), en parte por la observación de eclipses de las lunas, en parte por el albedo. En el caso de cuerpos irregulares se indican las dimensiones características.
8. Descubierta por Dollfuss, se la denominó «Jano». La sonda Voyager 1 permitió ver que se trataba de dos lunas prácticamente en la misma órbita (v. también notas de la tabla 3-2).
9. Los datos de las lunas de Urano proceden de las mediciones de Voyager 2 (v. Science, 233, 1-132, 1986).
10. Los datos de los anillos proceden de Greenberg y Brahic: Planetary Rings, U.o. Arizona Press, 1984, Science, 233, 39-107, 1986.
11. Densidad superficial en g/cm².
12. Los datos de las lunas de Neptuno proceden de las .mediciones de Voyager 2 (v. Science. 246,1417-1501, 1989).

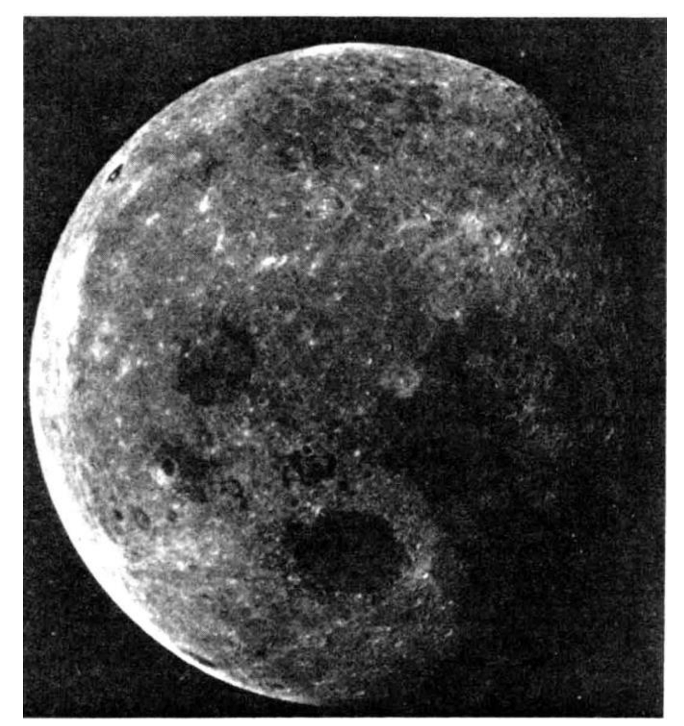


Fig. 8-1. La luna terrestre. Se aprecian claramente las zonas de «mare», más oscuras, y las zonas de ««terra», más claras.

La quinta luna (según las dimensiones del diámetro) del Sistema Solar es «nuestro» satélite (fig. 8-1). Con un tamaño de apenas la cuarta parte del de la Tierra, su fuerza de atracción representa tan sólo la sexta parte del valor terrestre; por eso daban saltos tan cómicos los astronautas de la misión Apolo. El despegue de las naves espaciales resulta más fácil en la Luna, ya que la velocidad de escape, que en la Tierra es de 11,2 km/s, se sitúa en nuestro satélite en tan sólo 2,38 km/s. La Luna nos muestra siempre la misma cara, apareciendo el 59% de su superficie, ya que se balancea un poco y el eje de rotación tiene una inclinación de 5,9° con respecto a la perpendicular de la

eclíptica: se puede ver un poco más allá de los polos. La estructura de su superficie se percibe por medio del telescopio. Desde que los hombres han llegado a la Luna la conocemos casi tan bien como a nuestro propio planeta; no se olvide que se han traído 380 kg de rocas lunares a la Tierra. Lo primero que llama la atención son unas superficies claras y otras oscuras. Se trata de dos tipos de áreas diferentes: zonas de «terra» o tierra más claras, que ocupan el 80% de la superficie y son muy accidentadas, y zonas de «mare» o mar, consideradas como mares de lava debidos a una antigua actividad volcánica. También hay montañas que han sido activas como volcanes. La Luna presenta numerosísimos cráteres meteóricos; en realidad los mares no son otra cosa que eso. El cráter más reciente es el Mare Orientale, de 900 km de diámetro, que, situado en el borde occidental de la Luna, apenas resulta visible desde la Tierra. Otros cráteres de este tipo son el Mare Imbrium (1.200 km de diámetro) y el Mare Serenitatis. Los peculiares nombres que reciben estos paisajes lunares se deben a la antigua convención de dar a los cráteres los nombres de grandes naturalistas (cráter Tycho, cráter Copérnico). Las zonas de «mare» (mar) tienen denominaciones más literarias: Oceanus Procellarum, el Océano de las Tempestades, o Mare Tranquillitatis, el Mar de la Tranquilidad. A las montañas se les han dado nombres terrestres, como «Alpes» o «Apeninos». Alrededor de los cráteres se elevan alineaciones montañosas circulares que alcanzan alturas de entre 2 y 7 km. Estas montañas descienden con una fuerte pendiente hacia el cráter, mientras que hacia el exterior presentan una ladera más suave. Esto apoya la idea de que se trata de cráteres meteóricos.

El mecanismo de la caída de un meteorito sobre un cuerpo celeste hay que imaginarlo del siguiente modo: la energía cinética del cuerpo que cae se transforma en una pequeña parte en calor, y en una gran medida de energía cinética del material desplazado por el impacto. Este material describe una parábola y cae de nuevo sobre el cuerpo celeste, donde puede formar un cráter secundario. En un cuerpo pequeño como la Luna, el material se puede esparcir por una zona muy amplia debido a la escasa fuerza gravitatoria. En un cuerpo de mayor tamaño, en

cambio, el material se concentra en un área más pequeña debido a la mayor aceleración de la gravedad. El impacto de un meteorito como el que formó el «Mare Imbrium» constituye una auténtica catástrofe. Hay quien relaciona las montañas formadas en la parte opuesta a estos cráteres con el efecto de la onda de choque que penetra en la Luna tras el impacto.

Los cráteres más antiguos han sido rellenados en parte por ríos de lava, que a su vez han sido «perforados» por impactos de menor importancia. Dado que esto no ocurre en el «Mare Oriéntale», se piensa que el número de impactos de meteoritos ha variado con el tiempo; en opinión de algunos autores incluso ha descendido exponencialmente en los últimos 4.000 millones de años. Por otro lado, en los cráteres meteóricos se ha descubierto el denominado «mascón»[14], término que designa a zonas de mayor densidad que se interpretan como anomalías en el campo de gravitación. También se ha comprobado que los cráteres más antiguos «flotan» sobre un material más denso que el de los más recientes. Todo ello aporta importantes datos sobre el origen de la Luna y su evolución «geológica».

La fase volcánica fue, sin duda, la última fase de la evolución de nuestro satélite. El material que rellena los mares es lava basáltica, que en las zonas más antiguas presenta un alto contenido en titanio. Esta lava tiene que proceder de zonas muy profundas (más de 150 km). Con el progresivo enfriamiento, la corteza de la Luna se formó hace 4.400-4.600 millones de años por la cristalización fraccionada de una zona exterior de varios cientos de kilómetros, avanzando la solidificación hacia profundidades cada vez mayores. Esta solidificación de fuera hacia dentro también está condicionada por el calor que se libera en el interior de la Luna merced a la desintegración de elementos radiactivos. Así pues, la temperatura máxima ha debido irse desplazando hacia el interior a lo largo de la evolución del satélite. Como consecuencia de este calentamiento se produjo un ascenso de los silicatos fundidos, lo que dio lugar a los ríos de lava basáltica que se hallan en la superficie. De este modo se

---

[14] De «mass concentrations».

rellenó una parte de los cráteres formados por meteoritos en épocas anteriores. Si el número de impactos se redujo bruscamente, es posible que prácticamente dejaran de formarse cráteres. Los cráteres meteóricos rellenos constituyen las actualmente tan conocidas zonas de «mare» de la superficie lunar. Conviene recordar que en la Luna no existe actividad volcánica o tectónica desde hace unos 3.000 millones de años y que sólo se registran suaves seísmos, cuyo origen podría estar en tensiones, que cambian periódicamente por el efecto de las mareas en la roca lunar.

La erosión de la superficie lunar está condicionada por el bombardeo de los meteoritos, ya que, debido a la ausencia de atmósfera, también llegan al suelo lunar los meteoritos más pequeños y el polvo interplanetario. Esto explicaría la formación de la profunda capa de polvo (regolita) que tanto asombró a los astronautas cuando pisaron el satélite.

Hoy la Luna está fría y quieta. No tiene una verdadera atmósfera y se halla rodeada de gas en equilibrio con gases nobles absorbidos en su superficie (helio, neón, argón), con una presión de 2×10^{-14} bar. La Luna tampoco posee un campo magnético propio. Era de esperar, ya que la existencia de campos magnéticos planetarios está ligada a la presencia de un núcleo fluido, pues sólo en él pueden fluir las corrientes necesarias para el «efecto de dinamo». La mayor velocidad de rotación en torno a su eje que la Luna tuvo anteriormente se redujo como consecuencia del «efecto de marea». Por ello no hay que descartar la posibilidad de que la Luna tuviera alguna vez un campo magnético. Esta idea la apoya también la imanación remanente descubierta en las rocas lunares. Las mediciones magnéticas realizadas en órbitas alrededor de la Luna han dado como resultado, debido a los campos magnéticos interplanetarios, fluctuantes y traídos por el viento solar, un límite superior del momento magnético de la Luna de una millonésima parte del valor terrestre. El núcleo fluido más grande posible correspondiente a este valor tendría 500 km de radio. Por lo demás, al estudiar la imanación de la corteza de la Luna parece como si se hubiera formado en un campo magnético cuyo momento

estuviera muy inclinado con respecto al eje de rotación. No se conocen las causas de este fenómeno.

La densidad de la Luna es bastante inferior a la de los planetas terrestres. Éstos contienen aproximadamente un 30% de hierro, al igual que los meteoritos pétreos. Esta proporción debió existir también en la nebulosa solar preplanetaria, hecho que nos lleva a la conclusión de que la Luna ha perdido (al menos) hierro. A través de pruebas realizadas en las rocas lunares se sabe que en ellas escasean los compuestos que son más volátiles que el hierro. Calcio, titanio y aluminio son los elementos que participaron fundamentalmente en los procesos de condensación acaecidos en la nebulosa solar a altas temperaturas; menos frecuentes son el bario, el estroncio, el uranio, el torio y las tierras raras. Las rocas lunares son ricas en los elementos mencionados en primer lugar. El titanio, por ejemplo, que es poco frecuente en la Tierra, ha aparecido en grandes cantidades en las primeras pruebas de rocas lunares, que contenían un 10% de compuestos ricos en este elemento. El hallazgo resulta muy importante, por cuanto explica fácilmente la densidad media de la Luna.

A partir de los datos dinámicos de nuestro satélite se deduce que éste tiene una corteza cuyo espesor oscila entre los 40 km de los polos y los 150 de la cara oculta, siendo muy irregular; también se sabe que el centro de gravedad está desplazado unos 2 km hacia la Tierra respecto del centro del satélite. Asimetrías de este tipo son frecuentes en los planetas. Es probable que en la Tierra y la Luna esta asimetría física tenga una causa común, y a ello nos referiremos en el próximo capítulo.

Las mediciones sísmicas han proporcionado más información sobre el interior de la Luna. Las naves Apolo trasladaron hasta ella los aparatos pertinentes y sus tripulantes los instalaron sobre la superficie. Los datos obtenidos confirman que la Luna es un cuerpo inactivo: no se ha I detectado actividad tectónica alguna. No parece existir nada parecido a la actividad sísmica de la Tierra, que está provocada fundamentalmente por el desplazamiento de grandes placas (tectónica) cerca de la superficie.

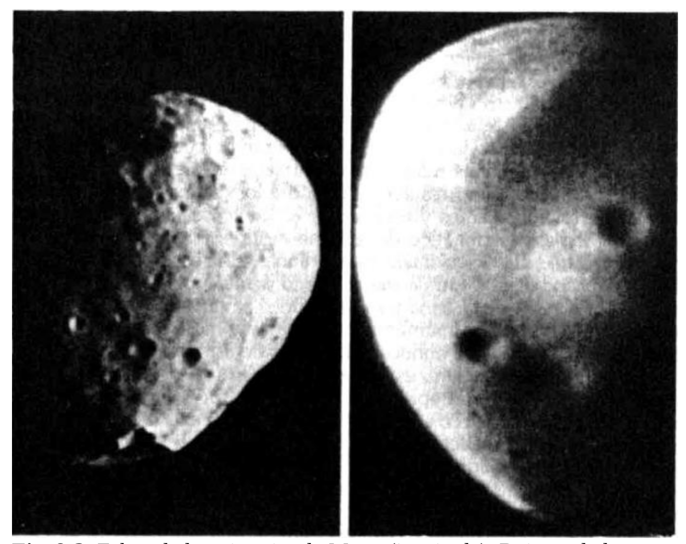


Fig. 8-2. Fobos, la luna interior de Marte (izquierda); Deimos, la luna exterior de Marte (derecha).

Al igual que en la Tierra, la propagación de las ondas sísmicas aporta datos sobre la estructura interna de la Luna. Para conseguir tales datos se dejó caer sobre la superficie lunar un cohete Saturno de una misión Apolo. De este modo se comprobó que en la corteza hay una zona homogénea de unos 60 km de espesor que probablemente esté compuesta de gabro. Las señales sísmicas penetraron hasta 150 km, que es la profundidad máxima que se piensa tiene la corteza.

La Luna registra ciertos movimientos sísmicos cinco días antes y tres días después del perigeo. Estos seísmos están provocados por el efecto de marea. Es posible que la emisión ocasional de argón y neón de la superficie lunar esté relacionada con estos movimientos. En cualquier caso, la escasa amortiguación de tales seísmos indica que la Luna está fría y, sobre todo, que no tiene un núcleo fluido.

Lo mismo se puede decir con toda seguridad de las lunas de Marte. Descubiertas en 1877, llevan un siglo sin ofrecer nin-

gún dato interesante. La sonda norteamericana Mariner 7 fotografió los dos satélites por primera vez, y la Mariner 9 lo hizo con posterioridad. El Viking-Orbiter 1 paso a 100 km de Fobos el 27 de febrero de 1977 y en mayo de 1980 lo hizo a 300 km; en octubre de 1977 el Orbiter 2 llegó a estar a 30 km de distancia (!) de Deimos. Las fotografías de Fobos (fig. 8-2, izquierda) tienen una resolución de las estructuras superficiales de 10 m; las de Deimos (fig. 8-2, derecha) de 3 m (!). El proyecto soviético de situar dos sondas interplanetarias sobre la superficie de Fobos fracasó en abril de 1989, debido a que se perdió el control sobre la sonda «Phobos» a causa de un fallo en el programa de control.

Estas dos lunas son muy oscuras, presentan un gran número de cráteres y probablemente tienen más de 1.500 millones de años. Se supone que se formaron al mismo tiempo que el Sistema Solar y están cubiertas de polvo (regolita). Las mediciones de la luz dispersa de Fobos coinciden con las de los condritos, así como con las de los asteroides Ceres y Pallas, por lo que a menudo éstos se consideran asteroides captados por Marte.

En torno a su eje más corto, Fobos rota sincrónicamente con su período de revolución, de 7,65 horas. Los ejes longitudinales de ambas lunas señalan hacia el planeta. La revolución de Fobos alrededor de Marte parece ser algo más rápida (10^{-3} grados por año). Fobos se aproximará a lo largo de algunos millones de años hasta el límite de Roche, lo que hará que se fragmente y más tarde caiga sobre el planeta Marte. Los cráteres que recubren la superficie de las lunas son, sin duda, cráteres de impacto producidos por meteoritos, pues hay que descartar la posibilidad de una actividad volcánica. El mayor cráter de Fobos, el Stickney, tiene un diámetro de 10 km. El impacto debió ser tremendo en una luna, que apenas mide el doble ($6{,}5 \times 10^{18}$ julios), hasta el punto de que puede decirse que es un milagro que siga existiendo. Fobos presenta además otra interesante estructura en su superficie: estrías de hasta 30 km de longitud, más de 20 m de profundidad y entre 100 y 200 m de anchura. Dado que estas estrías son más marcadas en las proximidades del cráter Stickney, su formación puede estar relacionada con éste: la

energía liberada alcanzó valores que casi habrían destruido la Luna (lo que al mismo tiempo indica que Fobos no es una estructura inconsistente, sino una roca estable). Las estrías podrían ser restos de fallas.

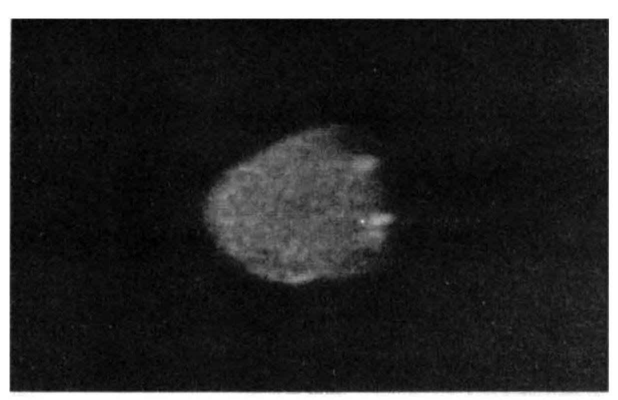


Fig. 8-3. El satélite más interior de Júpiter, Amaltea. La imagen fue tomada el 4 de marzo de 1979 desde la sonda Voyager 1, a una distancia de 425.000 km.

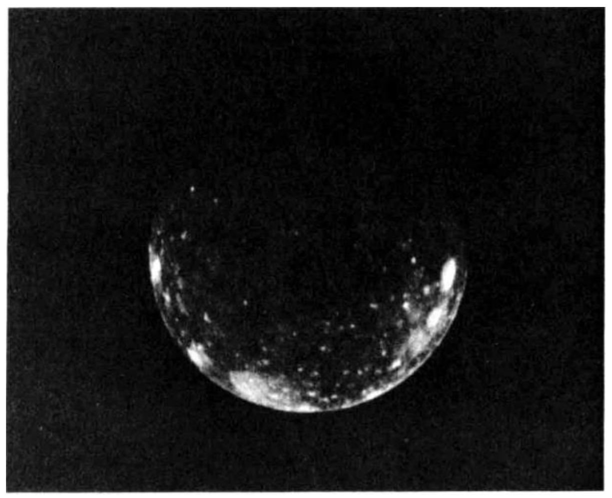


Fig. 8-4. Calisto, luna de Júpiter, fotografiada desde una distancia de 1,2 millones de km desde el Voyager 1, el día 5 de marzo de 1979.

Las sondas espaciales que operaron más allá de la órbita de Marte trajeron noticias de los satélites de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, que, en comparación con los de Marte, resultan casi ostentosos. La simple observación de las fotografías de las lunas de Júpiter realizadas durante la misión Voyager nos da una idea de la fascinación de este extraño mundo.

Apenas merece la pena hablar de Amaltea (fig. 8-3), una insignificante roca, cuando se tiene a la vista a Ío *(lámina 5),* cubierta de lava y azufre. A continuación está la luna Europa *(lámina 6),* que, atravesada por una red de grietas, parece una bola de cristal casi perfectamente redonda. Ganimedes *(lámina 7),* la más grande, se parece a la Luna de la Tierra en las formas de sus paisajes. Por último, Calisto (fig. 8-4) presenta una superficie cubierta de cráteres que parecen cicatrices.

Los planetas exteriores tienen en su conjunto un número mayor de lunas que los interiores. En Júpiter se distinguen tres grupos: el interior se compone de 7 lunas que giran en torno al planeta a distancias que oscilan entre 1,81 y 26,8 radios de Júpiter. La órbita de la luna más interior (J15) se encuentra justo fuera del anillo de polvo de Júpiter (v. más adelante). Es la más rápida, ya que su velocidad alcanza los 30 km/seg. Mucho más allá, a unos 160 radios de Júpiter, encontramos un grupo de 4 lunas, cuyos radios son notablemente más pequeños (10-30 km) que los de las lunas interiores (lunas de Galileo). Se mueven alrededor de Júpiter en órbitas relativamente excéntricas con 28° de inclinación con respecto al plano ecuatorial del planeta. El tercer grupo, compuesto también por cuatro lunas, se encuentra casi al doble de distancia, a unos 310 radios del planeta. Estas lunas son también muy pequeñas (radios de entre 10 y 20 km), pero, a diferencia de las demás, giran en torno a Júpiter en «órbitas retrógradas» (unos 150° de inclinación), esto es, en sentido opuesto. Es fácil suponer que las lunas de estos dos grupos exteriores, debido a que sus órbitas son muy parecidas (dentro de cada grupo), tienen un origen común y se trata en realidad de asteroides capturados por el planeta. Resulta difícil imaginar cómo se fueron reuniendo los cuerpos uno tras otro en órbitas comparables. Siguiendo la idea del físico soviético V. Aitekeva, es más fácil considerar a ambos

grupos como los restos de cuerpos de mayor tamaño destruidos, por ejemplo, en el choque con otros asteroides o con un cometa. Estas colisiones fueron muy frecuentes en los primeros tiempos del Sistema Solar, y buena prueba de ello lo son las superficies cubiertas de cráteres de las lunas más grandes. Por otro lado, la captura de tales objetos determina, por regla general, un fuerte calentamiento, con lo que resulta fácil imaginar su destrucción sólo por esta causa.

El grupo más interesante es el de las lunas interiores. Amaltea y las lunas sin nombre J14 y J15 son pequeños cuerpos rocosos acerca de los cuales no es mucho lo que se sabe. Esto resulta comprensible si se considera que los primeros vuelos de aproximación a Júpiter se centraron en los cuatro satélites de Galileo: Ío, Europa, Ganimedes y Calisto. Las lunas J14 y J15 se conocen sólo desde la misión Voyager, y únicamente se tienen datos sobre sus órbitas y sus dimensiones aproximadas. La órbita de J14 transcurre junto al borde exterior del anillo de polvo, y es posible que lo delimite. Amaltea fue descubierta en 1892 y resulta muy difícil de observar desde la Tierra. La superficie de esta luna es oscura, más bien rojiza. Se trata de un cuerpo alargado que señala con su eje mayor hacia el planeta.

Llama la atención el hecho de que el sistema de las lunas de Júpiter muestra una configuración similar a la del Sistema Solar: las lunas de mayor densidad son las más interiores. Es posible que estas lunas interiores perdieran los elementos ligeros debido al calor de la «estrella central», lo que ocurre con los planetas interiores y el Sol. En cualquier caso, existen indicios de que la superficie de Júpiter estuvo muy caliente en el pasado.

Ío es, en todos los sentidos, el cuerpo más interesante del Sistema Solar, y a ello no son ajenas sus fascinantes propiedades eléctricas, de las que nos ocuparemos más detenidamente en el capítulo XIII dedicado a las magnetosferas.

Las imágenes de Ío nos muestran un cuerpo de tonos amarillos y rojizos *(lámina 5)*, en el que existen zonas negras y blancas. Ya a comienzos del siglo observó E. E. Barnard unos casquetes rojizos en los polos de lo. Posteriormente se com-

probó que siempre que Ío salía de la sombra de Júpiter su luminosidad era, durante unos 15 minutos, mucho mayor que antes de entrar en la sombra del planeta. A partir de este hecho se dedujo que el satélite debía tener una atmósfera de la que se desprendían condensados con ocasión del paso por la sombra o se formaban nubes que poco después de salir de ésta elevaban el albedo. Se pensó que la superficie de Ío podía estar cubierta de azufre, cuyo color varía al enfriarse. En 1974 se descubrió que el satélite está rodeado por una zona de emisión amarilla: la línea D del sodio es responsable de ello. La emisión indica que existe un anillo a lo largo de la órbita.

La explicación de este hecho se ha encontrado, de un modo espectacular, gracias a las sondas Voyager: primero se comprobó que realmente existen sodio y azufre, con lo que la coloración de la superficie de la luna se explicó a través de los dos estados físicos del azufre. En estado sólido hay azufre monoclínico de color rojo y azufre rómbico, amarillo. Las manchas blancas se deben al hielo de dióxido de azufre *(v. lámina 5).*

Durante el paso de la sonda Voyager por Júpiter se publicó un trabajo científico en el que se estudiaba el efecto de marea en Ío. El autor del trabajo en cuestión estimó que el interior del satélite tenía que ser fluido, por lo que podían existir volcanes. Ese mismo día, una colaboradora del Jet Propulsion Laboratory de Pasadena, examinando las imágenes de Ío recién llegadas de la sonda, descubrió en el borde de la imagen algo que parecía una erupción *(lámina 9).* Tras realizar un análisis más detallado se comprobó que se trataba realmente de volcanes. Gracias a la misión Voyager se identificaron 8 volcanes activos que lanzaban material hasta alturas próximas a 320 km Estas erupciones volcánicas son más violentas que las del Vesubio, el Etna o el Krakatoa. Esto indica también que existe una especie de atmósfera de Ío que, de acuerdo con las mediciones de la misión Pioneer, tiene en la superficie del planeta una presión de 10^{-10} bar.

Con ello quedó explicada la existencia de una superficie cubierta de azufre en Ío y cómo pueden llegar el sodio y el azufre al toro a Ío largo de la órbita (cuyo diámetro es equivalente a un radio de Júpiter). Los volcanes también expulsan cenizas.

A partir de la altura alcanzada por estas partículas se han calculado velocidades en torno a 1 km/seg, por lo que no es tan sencillo que las cenizas puedan abandonar la luna (velocidad de liberación: 2,5 km/s). Pero dado que Ío se encuentra en la magnetosfera de Júpiter, resulta fácil suponer que las partículas de polvo también adquieren una carga eléctrica y escapan del campo gravitacional gracias a las fuerzas eléctricas. De este modo, a lo largo de la órbita de Ío se puede formar también un toro de polvo, que dentro de la magnetosfera se difunde en sentido radial hacia dentro y puede determinar la formación del anillo de polvo de Júpiter, que constituiría una característica cuasipermanente del sistema de este planeta determinada por la actividad volcánica de Ío.

Ío podría estar formado por material condrítico (v. cap. VII), de 3,7 g/cm^3 de densidad, que la desintegración radiactiva de nucleídos de corta vida fundió poco después de su formación junto con el calor de condensación, reforzado por la acción de las mareas. De este modo pudo constituirse un núcleo rico en hierro, que contenía también sulfuro de este mismo metal. Alrededor de él se formó un manto de silicatos y todas las sustancias volátiles se vaporizaron en seguida. Se calcula que el espesor de la corteza es de tan sólo 18 km y que durante el movimiento a lo largo de su órbita, ligeramente excéntrica, puede sufrir una deformación de casi 200 m con respecto a la forma media de Ío. El volcanismo también aporta elementos a la atmósfera, en la que se supone existen dióxido de azufre y sulfuro de hidrógeno (producto del bombardeo de protones), que determinan la existencia de una presión de 10^{-10} bar en la superficie. Donde hay aerosol (polvo fino), no están lejos los rayos, y como se sabe gracias a los experimentos realizados en el laboratorio, se forma también S_2O, cuyo color rojo anaranjado contribuye a asemejar la impresión óptica a la producida por la superficie de la Luna. Según esta idea, la superficie de Ío se habría formado posteriormente, es decir, sería más «joven», lo que concuerda perfectamente con la ausencia de cráteres de impacto.

La luna Europa tiene aproximadamente el mismo tamaño y la misma densidad que la terrestre; es la luna más luminosa de

las de Galileo. Su superficie muestra una compleja estructura de líneas, probablemente líneas de falla, que indican que la corteza está muy fracturada. En contraposición a Ganimedes y Calisto, Europa presenta muy pocos cráteres de impacto. Este hecho indica que la superficie, al igual que la de lo, es joven y que probablemente haya calor a poca profundidad por debajo de la corteza, debido de nuevo a la desintegración radiactiva y al efecto de marea. Sin embargo, este último representa menos del 10% de la energía transformada en Ío. Es posible que la luna esté recubierta por una delgada corteza de hielo de sólo 24 km de espesor, bajo la cual se encontraría material fluido. Las líneas, que a menudo tienen varios miles de kilómetros de longitud, recuerdan a las grietas que se forman en el hielo de los lagos helados. La temperatura de la superficie es de tan sólo 93°K.

Ganimedes es la mayor de las lunas de Júpiter, con un tamaño casi una vez y media superior al de la nuestra. La superficie, tal como podemos apreciarla en las fotografías, es una mezcla de diversas estructuras: zonas relativamente oscuras, cubiertas de cráteres, en las que se aprecian estructuras lineales (formadas por ondas de choque provocadas por el impacto de los meteoritos), y zonas más claras en las que existen indicios de plegamientos similares a los de la Tierra. Esto significa que esta luna ha seguido una interesante evolución en lo que se refiere a los movimientos tectónicos en su corteza de hielo (probablemente hielo de agua). Recientemente se ha estudiado Ganimedes por medio de impulsos de radar, en 3,5 cm de longitud de onda, con ayuda del radiotelescopio de 64 m que la NASA posee en Goldstone (California). Al intentar interpretar las señales devueltas a la Tierra se pudo apreciar que se trataba de superficies orientadas unas contra otras sin orden alguno, como en la banquisa, que está compuesta por trozos de hielo revueltos y amontonados los unos sobre los otros. Este tipo de estructuras provoca muchos reflejos, circunstancia que permite explicar el gran número de «estrellas» (los puntos luminosos que aparecen en las fotografías). Al igual que otras lunas, Ganimedes ha sufrido también el bombardeo de los meteoritos, prueba de lo cual es la existencia de algunos cráteres gigantescos.

Europa, Calisto y Ganimedes muestran una variación de la luminosidad a lo largo de su órbita, de modo que en la parte oriental son más luminosas que en la occidental (10-30%). Esto se interpreta como un efecto del albedo: las superficies de la luna que se encuentran delante en el movimiento orbital reflejan más luz. Hoy no está claro todavía a qué se debe este fenómeno. En cualquier caso, debe existir un importante proceso que es preciso conocer.

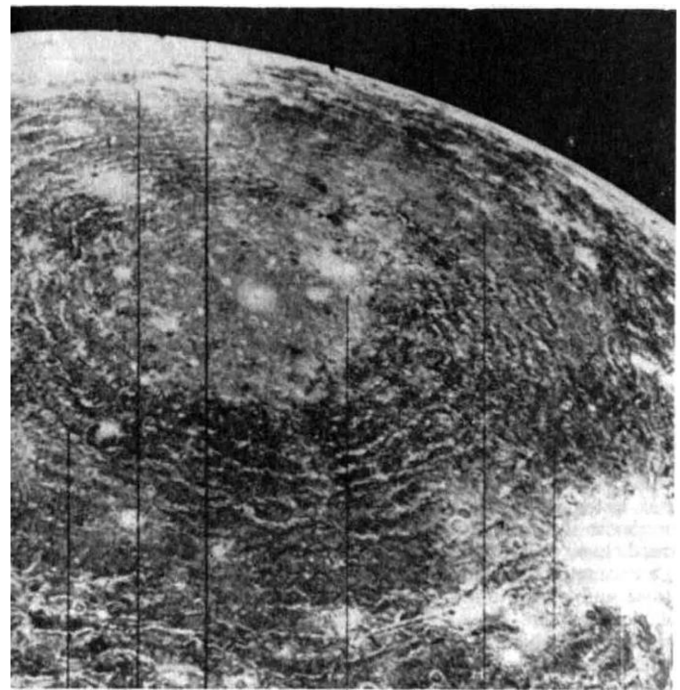


Fig. 8-5. La superficie de Calisto desde 200.000 km de distancia. Las estructuras circulares se parecen a las descubiertas alrededor de los cráteres de impacto en la Luna y en Mercurio. Posiblemente se trate de ondas «congeladas» que, tras el choque de un meteorito, se expandieron a partir del punto de impacto.

Calisto (fig. 8-4), la luna más exterior de Galileo, sólo un poco más pequeña que Ganimedes, es la que menor densidad

tiene. En su aspecto exterior se parece a Ganimedes, y también está recubierta de cráteres de impacto. Su superficie —más oscura que la de las demás lunas— es probablemente la más antigua de las cuatro, ya que el origen del satélite se sitúa poco después de la formación del Sistema Solar. En una de las fotografías (fig. 8-5) se observa un gigantesco cráter de impacto de unos 600 km de diámetro, alrededor del cual se disponen anillos prácticamente concéntricos, como las ondas que se forman alrededor de una piedra lanzada al agua. Es probable que el cuerpo que chocó contra la luna provocara un reblandecimiento ocasional del material del entorno, de modo que las ondas se «congelaron» en el material ya endurecido. Al igual que en las demás lunas de Galileo, la superficie está compuesta de hielo «ensuciado» por material meteórico. Sin embargo, en contraposición a Ganimedes, no existe ningún indicio de movimientos de la corteza o actividad interna. Es muy probable que en la superficie de Calisto haya dióxido de azufre.

Calisto y Japeto también muestran en su órbita cambios de luminosidad que —si se deben, como parece, a la variación del albedo— se podrían explicar por el hecho de que ambos satélites se mueven en un «entorno polvoriento». Dado que su rotación es (como sucede en todas las lunas exteriores) sincrónica, el polvo se amontona en su parte delantera, lo que las hace aparecer más oscuras. Desde la Tierra se ven más luminosas en la parte occidental de su órbita alrededor del planeta.

En el Sistema Solar conocemos cuatro planetas con satélites «regulares», nombre que reciben aquéllos que giran alrededor del planeta en el plano ecuatorial describiendo órbitas aproximadamente circulares; se trata de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Los cuatro tienen, además, sistemas de anillos (fig. 8-8). En Saturno, sólo Japeto, Febe e Hiperión no son satélites regulares; en Júpiter, las lunas exteriores. Las lunas de hielo de Saturno tienen densidades que oscilan entre 1 y 2 g/cm^3, y a excepción de Titán no poseen atmósfera; todas son claras (su albedo se sitúa en tomo a 0,4) y se supone que están cubiertas de hielo de agua o escarcha.

Sólo Titán alcanza un tamaño respetable. Menos Febe y Japeto, los satélites se mueven prácticamente en el plano ecuatorial del planeta y, con la excepción de Hiperión y Febe, describen órbitas casi circulares. Febe es la única luna con rotación retrógrada, por lo que ocupa una posición especial; además esta luna se mueve a gran distancia de Saturno (por lo que sufre la perturbación del Sol). Desde el punto de vista de las características ópticas, Febe muestra un gran parecido con las lunas exteriores de Júpiter, de cuya semejanza con los asteroides ya hemos hablado anteriormente. Entre la órbita de Febe y las órbitas de las demás lunas existe un gigantesco espacio «vacío». El sistema de Saturno es muy diferente del de Júpiter. Entre los satélites del primero se cuenta todo un grupo de pequeños cuerpos que, en número desconocido, se mueven en el borde de los anillos. La revolución de Hiperión (fig. 8-6) se halla muy próxima a la resonancia 4:3 con la luna Titán. La mayoría de las lunas de Saturno giran sincrónicamente al período de revolución, y en consecuencia muestran siempre la misma cara al planeta. Febe tiene un período de rotación de 9-10 horas, pero tarda550 días en dar la vuelta a Saturno. Dado que su órbita se encuentra en la eclíptica, y no en el ecuador, es muy probable que se trate de un asteroide capturado. A continuación vamos a exponer con más detalle lo que en la actualidad se sabe sobre las lunas de Saturno. Las *láminas 10* y *11* muestran fotografías, tomadas durante la misión Voyager, de Titán, Dione, Rea y Japeto.

Mimas (fig. 8-6), el satélite regular interior más alejado de Saturno, se caracteriza por la presencia de un gigantesco cráter de 130 km de diámetro, cuyos bordes alcanzan más de 5 km de altura pero cuyo fondo se encuentra casi 18 km por debajo de la superficie del entorno. Sobre el fondo del cráter se eleva una gran montaña central que mide unos 6 km de altura y que tiene una base de 30 km, aproximadamente, de diámetro.

Este cráter, formado quizá por el impacto de un meteorito, tuvo que destruir prácticamente la luna. En sus proximidades hay otros cráteres de menor tamaño, repartidos por la superficie de un modo más o menos regular. En su mayoría tienen forma

de «plato» y todos son más profundos que los cráteres de nuestra Luna o de las lunas de Júpiter.

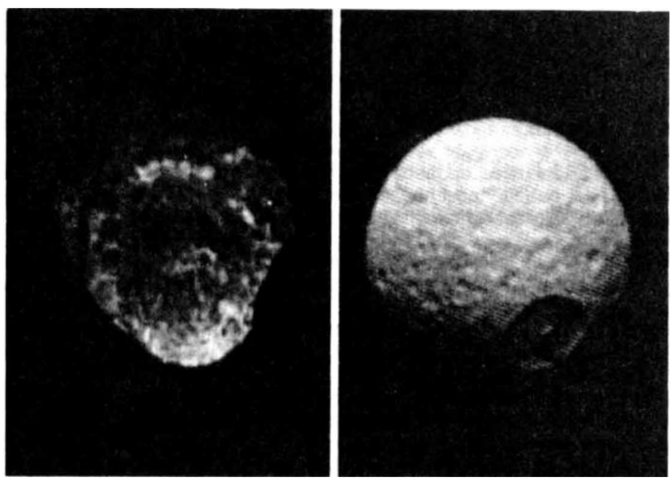


Fig. 8-6. Fotografía de la luna de Saturno, Hiperión, realizada por el Voyager 2, el 24 de agosto de 1981, desde 500.000 km de distancia (izquierda); fotografía de la luna Mimas realizada por el Voyager 1, el 12 de noviembre de 1980, desde 425.000 km de distancia (izquierda).

Esto puede ser una consecuencia de la escasa fuerza de gravitación. Además de los cráteres se observan en la superficie estrías de 1-2 km de profundidad, casi 100 km de longitud y más de 10 km de anchura. Es probable que estas estrías guarden relación con el impacto en virtud del cual se formó el cráter mencionado. La luminosidad de la superficie se puede entender fácilmente si se piensa que el suelo está cubierto de escarcha.

Con 500 km de diámetro, Encélado es sólo un poco mayor que Mimas, del que se encuentra próximo. Tiene una superficie más llana que éste, pero sobre todo llama la atención el hecho de que no presente cráteres. Posee un albedo superior al del resto de los satélites cubiertos de hielo, por lo que su superficie presenta unas características poco comunes. Dado que su órbita está muy influida por el efecto gravitacional de Dione, el efecto de marea en el interior de la luna podría provocar un calentamiento (como en la luna de Júpiter, Ío). En tal caso habría que

pensar que el cuerpo de la luna es fluido y está cubierto sólo por una delgada capa de hielo. Como el anillo «E» muestra un aumento de su luminosidad cuando Encélado está en sus proximidades, se puede suponer que los trozos de hielo de Encélado lo «alimentan» con majadal.

De Tetis se había pensado siempre que era una luna con una densidad muy baja. Las mediciones del Voyager 1 —si bien de escasa resolución para esta luna— dieron un valor de 1, con lo que se puede suponer que el satélite está compuesto de hielo. Es muy poco conocida la estructura de su superficie, pero existen cráteres y una especie de valle cerca del terminador. El cráter más grande tiene un diámetro de 460 km.

Dione, *(lámina 10)*, que no es tan grande como Tetis, tiene, sin embargo una densidad más alta (v. tabla 8-1) y presenta un aspecto totalmente diferente. Los cráteres son menos profundos que los de Tetis y el albedo varía mucho más en la superficie. Se observa claramente una estructura de 240 km de diámetro, que podría ser un cráter. Se supone que el material claro de la superficie es hielo o escarcha. La mitad de la luna situada delante en la órbita muestra dos estructuras topográficas diferentes: una zona más antigua, cubierta de cráteres de hasta 165 km de diámetro, y una zona llana con pocos cráteres. Esta última se halla cubierta por una capa más reciente lo suficientemente profunda como para tapar los cráteres ya existentes. Podría tratarse de material procedente del interior o del expulsado como consecuencia del impacto de un cuerpo. En la zona polar del sur de Dione existe una gran fosa de unos (.500 km de longitud: en la zona polar septentrional se observa, en cambio, una tupida red de valles. No se ha ofrecido todavía ninguna explicación sobre la naturaleza de estas estructuras.

La sonda Voyager 1 sobrevoló la mitad septentrional de la luna Rea *(lámina 11)* a una distancia de tan sólo 59.000 km. lo que nos permite disponer de informaciones muy detalladas sobre esta luna. La superficie presenta un gran número de cráteres de impacto y se parece mucho a las zonas de terra de la Luna. La escasa fuerza de gravitación de Rea hizo posible un rápido enfriamiento de este satélite. Por lo que su corteza pudo «conservar» los cráteres.

Las zonas claras y oscuras de Dione y Rea son presumiblemente eyecciones de hielo de cráteres de impacto recientes. Hay, por lo demás, una nítida línea de separación entre ambas zonas, lo que no resulta fácil de entender. Es posible que las superficies tengan edades diferentes y que las oscuras se formaran con material procedente del interior, de modo que quedaran ocultas las estructuras ya existentes. La temperatura de la superficie de Rea es de 99°K. valor que en los polos desciende a 93°K. A partir del perfil de emisión se puede deducir que en la superficie aparecen unos materiales más fríos que otros. Podría tratarse de hielo y escarcha (el hielo tendría un espesor de 10 km. esto es, igual al registrado en Europa y Ganimedes).

Lo que más llama la atención en la luna Japeto (*lámina 11)* es la diferencia del albedo entre la cara anterior y la posterior (en el sentido del movimiento de revolución). El límite entre los hemisferios claro y oscuro no es nítido, sino, más bien, relativamente impreciso: en el hemisferio oscuro no se encuentran zonas «claras»: en cambio, en el claro se aprecia un círculo oscuro de unos 400 km de diámetro. Los datos de que se dispone permiten deducir que la superficie clara está compuesta de hielo. El hemisferio oscuro es rojizo, como el material oscuro de la luna de Júpiter, Calisto, y la superficie se muestra similar a los condritos con contenido en carbono. Sin embargo, en el infrarrojo Japeto se diferencia claramente de Calisto.

Hoy se barajan tres posibles explicaciones de este hecho: 1) el hielo puede estar erosionado en la cara anterior de la luna, con lo que quedan a la vista estructuras rocosas de tono más oscuro: 2) el hielo se ha concentrado preferentemente en las partes posteriores de las estructuras, y 3) puede haber salido material del interior. En el estado actual de nuestros conocimientos no se puede descartar ninguna de estas tres posibilidades. Finalmente, la luna Febe podría ser un asteroide capturado.

Desde el vuelo del Voyager 1 se conocen cinco lunas pequeñas dentro de la órbita de Mimas. Las dos exteriores, que se denominan de manera provisional 1980 S1 y 1980 S3, ya habían sido descubiertas en 1966 por A. Dollfus, pero se pensó que se trataba de una sola luna (Jano) con unas características

muy peculiares. Este problema quedó resuelto cuando se comprobó que había dos lunas cuyas órbitas están separadas por sólo 50 km de distancia. Estas lunas presentan una forma muy irregular: podrían ser las dos mitades de un cuerpo dividido por el impacto de un gran meteorito, lo que quizá también haya sucedido en Mimas. A las lunas interiores se les dio en 1980 la denominación de S13, S14 y S15 (todas ellas serán «bautizadas» por la Unión Astronómica Internacional). Las dos más grandes mencionadas en primer lugar, se mueven a ambos lados del anillo F. mientras que S15 lo hace por fuera del anillo A. limitando el sistema de anillos por el lado exterior. Todas ellas son cuerpos muy irregulares que señalan hacia Saturno con su parte más larga.

Por último, en el punto de libración «principal» (v. apéndice 5) de Dione se descubrió otra luna pequeña, a la que se ha denominado 1980 S6. Dione, que parece influir en la emisión radioeléctrica de Saturno —al igual que lo influye en la de Júpiter—, es probable que tenga una especie de ionosfera.

La luna Titán *(lámina 10)* ha resultado ser bastante más pequeña de lo que antes se pensaba: su radio mide tan sólo 2.575 km. Es la luna más grande del sistema de Saturno, y la segunda en tamaño dentro del Sistema Solar, después de Ganimedes. El efecto de marea la ha llevado a un periodo de rotación igual a su período de revolución, que dura unos 16 días de la Tierra. El eje de rotación es perpendicular al plano de la órbita (con un error de ±5 grados). Las primeras mediciones de su diámetro resultaron erróneas, pues no consideraron por separado una capa de polvo de 40 km de espesor que rodea al satélite a una altura de 245 km *(lámina 13)*.

Las nubes, que ocultan la superficie, son de color rojizo: si en el hemisferio meridional presentan una luminosidad uniforme, en el septentrional, en cambio, están ligeramente estructuradas (se aprecian estructuras zonales). Las fotografías realizadas por la sonda Voyager, con una resolución de 3 km, no muestran «agujeros» en las nubes, que son muy espesas en todas partes.

La presión atmosférica es de 1,5 atmósferas en la superficie lunar, esto es, un 50% superior a la que se presenta en la superficie de la Tierra. El paso de la sonda Voyager por Titán se produjo poco después del comienzo de la primavera en esta luna. Es fácil pensar que una atmósfera como la de Titán reacciona con un cierto retraso ante los cambios externos. Esto nos ha llevado a la conclusión de que durante el vuelo era todavía invierno en las capas inferiores de la atmósfera, lo que explicaría la diferencia entre ambos hemisferios.

Titán se mueve dentro de la magnetosfera de Saturno. Cuando la presión del viento solar es muy fuerte, la magnetopausa se puede desplazar más hacia el interior, lo que deja a Titán expuesta al viento solar. Para analizar los fenómenos que tienen lugar entonces hay que saber si Titán posee un campo magnético. Tras el paso del Voyager 1 por Saturno se redujo el límite superior de su momento magnético a 5×10^{17} teslas cm^3. De ello se deduce que la luna puede tener un núcleo conductor, pero que su radio es de 700 km como máximo. Por ello no es probable que cuente con un campo magnético propio.

Sin embargo, dentro de la magnetosfera de Saturno existe en Titán un campo magnético inducido, pues el plasma magnetosférico se mueve alrededor de la luna. De este modo se crea un potencial eléctrico de 6.000 voltios, que pone en funcionamiento un sistema de corrientes cuyo campo magnético desfigura tanto el de fondo que aquél llega a rodear a la luna como una burbuja. Debido a la ausencia de un campo magnético propio, debemos imaginar que la influencia mutua entre luna y plasma ha de ser semejante a la característica en Venus (v. cap. XIII) o en un cometa. Es probable que Titán sea una importante fuente de plasma en la magnetosfera de Saturno.

Las fotografías de Saturno y sus lunas realizadas por la sonda Voyager han supuesto el mayor avance en nuestros conocimientos sobre el sistema de este planeta desde el siglo XVII, cuando Huygens y Cassini descubrieron las lunas y el sistema de anillos. El número de cráteres de la superficie de las lunas aporta valiosas informaciones que permiten conocer la historia del planeta, y posiblemente también su origen.

Aunque los cráteres de impacto de las lunas pueden haber sido originados por material del sistema de Saturno (p. ej., material de los anillos), también es posible que hayan surgido de resultas de material llegado desde el exterior. En la actualidad se acepta que la cantidad de material procedente de los restos de cometas es más de diez mil veces superior a la que tiene su origen en los fragmentos de asteroides.

En el sistema de Saturno se «esconden» dos hechos dignos de mención: la densidad de las lunas interiores aumenta con la distancia respecto al planeta (en contraposición al sistema planetario, al de Júpiter o al sistema exterior de Saturno), y un buen número de los cráteres de impacto en Mimas y Dione muestran diámetros de unos 10 km, mientras que en Rea el número de cráteres con más de 100 km de diámetro es muy superior al de los de menor tamaño. Por ello se supone que los cuerpos que originaron los cráteres pertenecen a dos «familiar» diferentes. Las regiones de cráteres más recientes han sido formadas, sin duda, por la familia que mayor número de cuerpos pequeños contenía. Por el contrario, las regiones con muchos cráteres grandes podrían proceder de una fase muy temprana, como las zonas altas de la Luna (terra), de Marte o de Mercurio, que se formaron hace 4.000 millones de años. En aquel momento disminuyó drásticamente el número de rocas errantes por el Sistema Solar, ya que con el paso del tiempo habían sido «recogidas» por los planetas y las lunas. En otras partes del Sistema Solar se ha comprobado que el número de partículas secundarias —esto es, aquellas que son expulsadas como consecuencia del choque de un cuerpo— aumenta con la cuarta potencia del valor inverso del radio. Por consiguiente estas partículas dan lugar a cráteres muy pequeños, como se observa en la segunda familia de cuerpos antes mencionada. Pero de lunas tan pequeñas como las de Saturno escapa un gran número de estos cuerpos debido a la escasa fuerza de gravedad. La superficie de Dione y Rea se cubrió con material que llegó incluso a tapar parcialmente los grandes cráteres. Los fragmentos lanzados antes, así como los meteoritos, los cometas y el material perteneciente al sistema de Saturno que llegaron después, for-

maron en la superficie del sistema de cráteres aquéllos que hemos incluido arriba en la segunda «familia». Con este modelo se intenta explicar los numerosos detalles descubiertos durante el vuelo del Voyager y englobarlos en el marco de la historia del origen del Sistema Solar.

Si se comparan las densidades de las lunas con los modelos sobre su estructura, se aprecia que Tetis podría estar totalmente compuesta de hielo (hielo de agua y de metano), mientras que Titán y Dione, al igual que Ganimedes y Calisto, parecen estar formadas en un 40% de material rocoso y en un 60% de hielo. En el resto de las lunas de Saturno la proporción de roca es menor, pese a lo cual estos satélites no están compuestos sólo de hielo. El aumento de la densidad desde Mimas hasta Titán refleja, sin duda, las especiales circunstancias de la formación del sistema de Saturno. Los modelos sobre el origen de Júpiter o Saturno muestran claramente que estos planetas debieron ser varios cientos de veces más grandes antes de contraerse lentamente: en algún momento sufrieron un colapso gravitacional y continuaron contrayéndose con una menor velocidad. En la primera fase fueron también más luminosos que hoy, de modo que el estado físico de su entorno estaba determinado fundamentalmente por el flujo térmico procedente de estos planetas gigantescos. En consecuencia, se piensa que en Júpiter el agua y el metano no pudieron condensarse cerca del planeta, por lo que Ío y Europa son lunas «rocosas», en contraposición a Ganimedes y Calisto, que tienen una gran proporción de hielo. La masa de Saturno es sólo una tercera parte de la de Júpiter, por lo que su luminosidad debió de ser diez veces inferior a la de éste, de modo que el vapor de agua podía condensarse más cerca del planeta: todos los modelos de Saturno muestran densidades de 1 2 g/cm^3. Pero es posible que, en el momento de la formación de la luna. Saturno llegara hasta más allá de la órbita de Tetis. Entonces —se piensa— las partículas de silicatos fueron expulsadas hacia fuera por la presión del gas, situándose en las proximidades de las órbitas de Dione, Rea y Titán. Las lunas y los anillos que se formaron de este modo dentro del planeta Saturno tienen que estar compuestos casi totalmente de hielo,

con pocos elementos rocosos (silicatos). Las distintas densidades de las lunas interiores podrían deberse —a la vista de las reducidas masas— a la variación estadística que puede resultar de la condensación de materia en diversos puntos.

Esta exposición corresponde a la interpretación de las observaciones del equipo Voyager, por lo que tiene un carácter especulativo y es posible que no responda a la realidad. Pero de momento es la única descripción detallada del sistema de Saturno, y pasarán muchos años antes de que se elaboren modelos plenamente satisfactorios.

Las teorías acerca de las lunas de los planetas exteriores han mejorado bastante tras el paso de las sondas interplanetarias por las proximidades de éstos. Todas se mueven a lo largo de órbitas circulares en el plano del ecuador, se encuentran en rotación sinódica (es decir, presentan al planeta siempre la misma cara) y el sentido en que recorren la órbita es, en casi todas ellas, en la dirección del movimiento del planeta.

Las cinco mayores lunas de Urano son claramente más brillantes que las pequeñas. Al igual que la mayoría de las lunas del Sistema Solar, las lunas de Urano presentan innumerables huellas de impactos. Mientras que en las fases iniciales «impactaban» en parte cuerpos de gran tamaño —que los planetas no habían «recogido» todavía—, los cráteres correspondientes a las fases posteriores se deben al impacto de cuerpos mucho menores. Como se discute más arriba, esto permite llegar a conclusiones acerca de la antigüedad de las superficies.

Oberón y Titania (fig. 8-14) son las mayores lunas de Urano. Oberón está cubierta por cráteres antiguos y en ella no se pueden reconocer rastros de actividad tectónica. Titania (fig. 8-13) presenta grandes cráteres de impacto. Fosas y dislocaciones con señales de actividad tectónica que deben de haber tapado los cráteres. El enfriamiento de la luna podría haber sido la causa de la aparición de las grietas en su superficie a causa del agua congelada. Si este proceso se hubiese iniciado relativamente tarde, este hecho podría explicar la baja densidad de cráteres que presenta su superficie. Otra hipótesis contempla la posibilidad de que la luna se fragmentase por el impacto de un

cuerpo de gran tamaño y sus fragmentos se volviesen a unir más tarde para dar lugar a una nueva superficie.

Las masas de Oberón y Titania se han podido determinar y han permitido obtener sus densidades (tabla 8-1). Según estos datos, ambas deberían contener entre un 40 y un 65% de material rocoso.

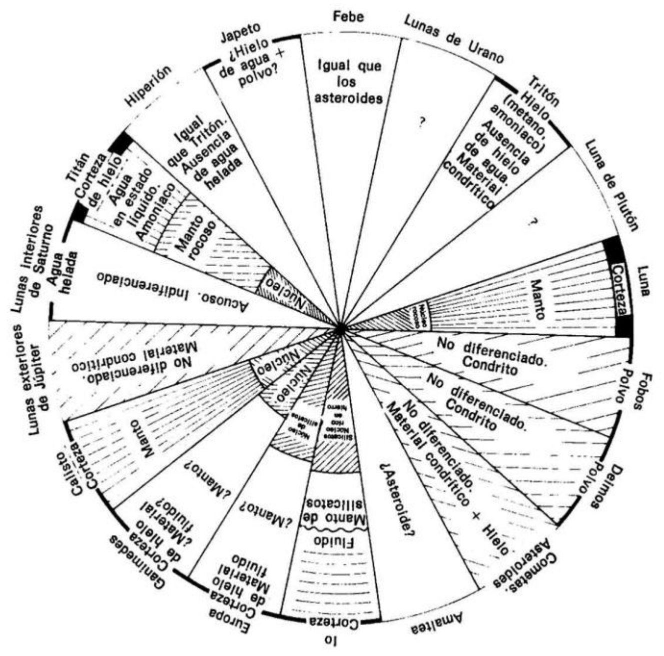


Fig. 8-7. En esta figura se recogen los conocimientos actuales sobre la estructura interna de las lunas del Sistema Solar. La estructura de las lunas se parece a la de los planetas por su división en núcleo, manto y corteza. Sin embargo, la constitución química de las lunas es muy diversa, sobre todo en las zonas externas. En las lunas del Sistema Solar exterior predominan las cortezas de hielo.

Las lunas interiores. Ariel y Umbriel, se diferencian por su albedo. Umbriel es la más oscura y Ariel es la más clara de las cinco grandes lunas del planeta (tabla 8-1). La superficie de Umbriel, oscura y sembrada de cráteres, parece «antigua», mientras que la de Ariel parece más joven (menos cráteres de

impacto), originada posiblemente como consecuencia de un proceso volcánico. Una masa viscosa de roca y hielo podría haberse extendido, desde el punto en que surgió, sobre la superficie antigua de la luna cubriéndola.

Miranda *(lámina 8-13),* la menor de las cinco grandes lunas, es en realidad el objeto más interesante. En su superficie encontramos llanuras cubiertas por cráteres, sobre las que se elevan tres imponentes montañas de poca densidad y con diámetros de entre 200 y 300 km, que son presumiblemente más recientes. Miranda podría haberse fragmentado y reconstituido también en diversas ocasiones. La diferenciación, es decir, la existencia de calor interno, sería otra posible explicación. El material más pesado se hundió hacia su interior mientras que el hielo, más ligero, era expulsado hacia el exterior. Cuando la pérdida de calor había hecho que aumentase la viscosidad, este proceso podría haberse detenido, lo que habría dado lugar a la formación de las montañas (fig. 8-14).

Los rastros de la actividad tectónica constituyeron la gran sorpresa del paso de las sondas interplanetarias Voyager. La desintegración radiactiva de los átomos en su interior y la fricción debida a los, fenómenos de marea son posibles fuentes de calor para este tipo de procesos.

Otra cosa que sorprende es la alta densidad de las lunas de Urano, ya que se habían esperado densidades inferiores (una mayor proporción de hielo). Este punto está pendiente todavía de aclaración, es decir, se está tratando de incorporar estas observaciones en la teoría acerca de la formación de los planetas.

Dos de las nuevas lunas de pequeño tamaño descubiertas son, al igual que en el caso de Saturno «satélites pastores», mientras que las ocho restantes se mueven entre los anillos y Miranda. De ellas, siete tienen radios comprendidos entre 40 y 80 km y todas tienen superficies oscuras, mientras que ninguna presenta atmósfera.

Presumiblemente, las lunas de Urano y Neptuno están formadas por un material que conocemos ya por las condritas carbonosas; el núcleo del cometa Halley también es negro. Es lógico pensar que las superficies oscuras están formadas por carbono polimerizado, generado a partir del bombardeo constante

con partículas cargadas. El hielo de metano se vuelve negro sometido a la acción de una radiación de este tipo, como se ha verificado experimentalmente en el laboratorio.

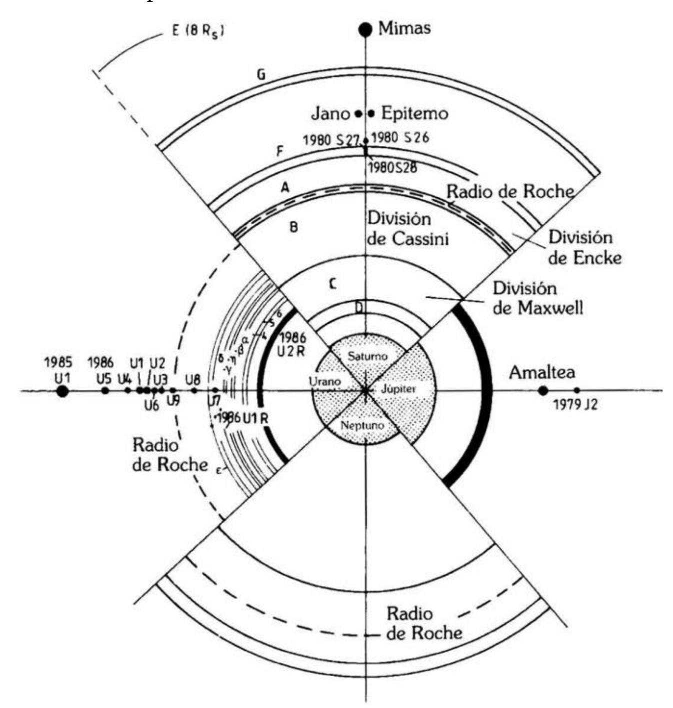


Fig. 8-8. Los sistemas de anillos de los planetas exteriores y sus lunas interiores (v. también la tab. 8-1). La proximidad de algunas lunas respecto de los anillos hace que actúen como «satélites pastores», que determinan la estructura de los anillos (en el caso de Saturno 1980 S26 y S27, en el Urano U7 y U8).

Con anterioridad al paso de la sonda Voyager se conocían únicamente dos lunas de Neptuno: Tritón y Nereida. Para poder observar Tritón (fig. 3-7), la sonda interplanetaria tuvo que llevar a cabo una serie de complejas maniobras de desviación y orientación. Sin embargo, esto permitió que la sonda descubriese además seis pequeñas lunas oscuras, si bien se supone que existen más. Estas maniobras permitieron la recepción de

señales de radio que habían atravesado la atmósfera de Tritón, lo que posibilitó determinar la presión y la temperatura que reinan en ella. Con anterioridad se sabía bastante poco acerca de Tritón: en 1978 se detectó la presencia de metano y en 1983 la de nitrógeno. Tritón es más pequeña de lo que se suponía y es comparable con Plutón, en cuanto a su tamaño y distancia respecto del Sol. Su superficie está cubierta por fracturas, que indican la presencia de actividad volcánica. Las montañas quedaron cubiertas por repetidas erupciones. Esta luna presenta, a causa de la precesión de su órbita, estaciones debidas presumiblemente a que el nitrógeno líquido es cubierto periódicamente por hielo de metano.

Tritón se mueve, al igual que Febe, a lo largo de una órbita retrógrada, es decir, en sentido contrario a la rotación del planeta, por lo que se sospecha que fue capturada por éste. La órbita, inicialmente elíptica, se fue degradando como consecuencia de la fricción debida a los fenómenos de marea, lo que pudo posibilitar la aparición de la actividad volcánica. La figura 8-12 nos ofrece pistas acerca de ello.

La temperatura superficial de Tritón es de tan sólo 33°K. lo que hace que sea una de las lunas más frías del Sistema Solar. La presión atmosférica en la superficie del planeta es de tan sólo 10 µbar. La densidad de Tritón indica que tiene un alto contenido en roca, por lo que debió de formarse en una fase muy temprana de la historia del Sistema Solar.

La luna de Plutón, Caronte, rota alrededor del planeta con el mismo período con el que éste gira alrededor de su eje ($6{,}4^d$), por lo que ambos cuerpos se dan siempre la misma cara uno a otro. Caronte es «gris» y carece probablemente de atmósfera.

Nuestra exposición quedaría incompleta si no habláramos de los anillos de los planetas. Al mencionar este fenómeno todos pensamos en los anillos de Saturno, que ya llamaron la atención en las primeras observaciones realizadas con telescopio. En 1655 Christian Huygens habló por primera vez de los anillos. En un principio se les designó con las letras A y B. En el siglo XIX se descubrió un anillo más delgado, al que se denominó C, y en 1969 se añadió el anillo D. Entre los anillos se

descubrieron agujeros, a los que se dio el nombre de sus descubridores, hablándose entonces de división de Cassini (entre A y B), división de Encke (dentro del anillo A), etc. Su existencia se relacionó con las resonancias orbitales con la luna Mimas. Los anillos se encuentran en el plano ecuatorial y, en dirección norte-sur, presentan un grosor de apenas 3 km. Tras la misión Voyager se comprobó que todas las estructuras basadas en las observaciones realizadas desde la Tierra eran poco relevantes. Las imágenes enviadas por las sondas espaciales mostraron100.000 estructuras anulares concéntricas dentro de cada uno de los anillos «clásicos», como si se tratara de los surcos de un disco *(lámina 12).* Por lo demás, los espacios que hay entre los anillos tampoco están vacíos.

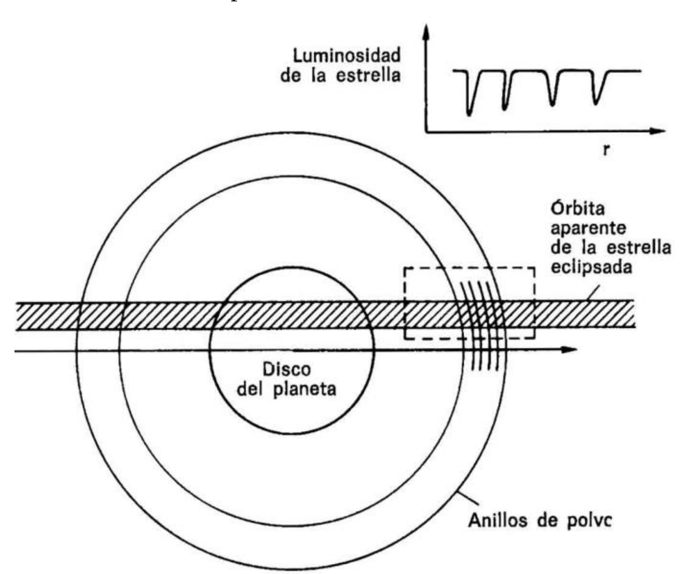


Fig. 8-9. Descubrimiento de los anillos de Urano durante el paso del planeta por delante de una estrella. Arriba, a la derecha, se representa esquemáticamente el registro de la luminosidad estelar durante el paso del planeta. Dado que se observó el mismo fenómeno antes y después del eclipse, la única explicación es la existencia de un sistema de anillos de polvo.

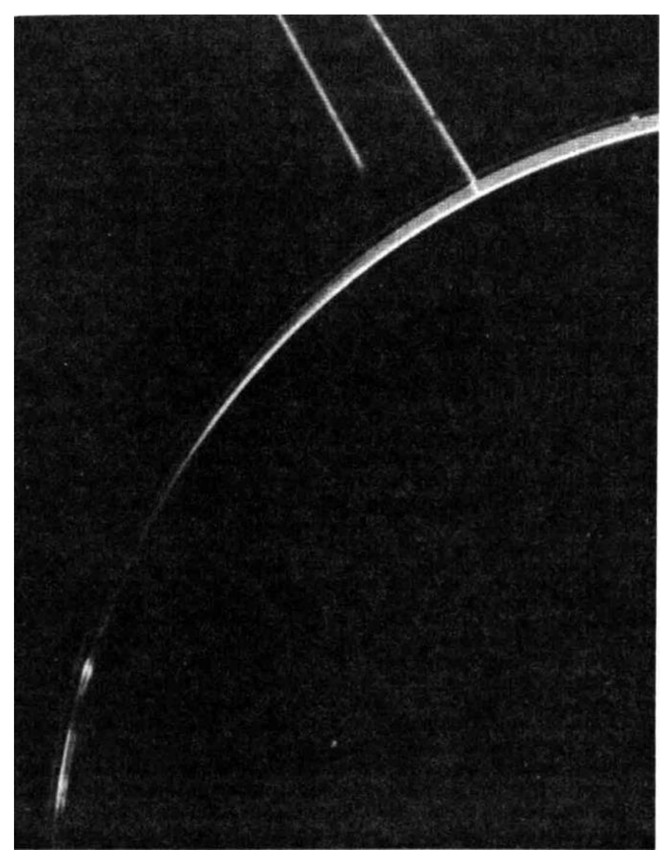


Fig. 8-10. Sistema de anillos de Júpiter, descubierto durante la misión Voyager. El Voyager 2 estaba a 1,45 millones de km de Júpiter, en el cono de sombra del planeta, un poco por debajo del plano del anillo. Delante del planeta el anillo no se puede ver en la sombra de Júpiter. La fotografía se realizó con un tiempo de exposición muy largo, por lo que el borde del planeta no resulta nítido.

El sistema de anillos tiene un diámetro exterior de 280.000 km y se encuentra en el plano ecuatorial del planeta. El anillo más próximo a éste, el D, se extiende hasta la capa de nubes del planeta y se ha comprobado su existencia a 66.500 km de

distancia del centro. El material que compone el anillo D es parecido al polvo.

El anillo C (fig. 8-7), que rodea al D, presenta el aspecto de una serie de anillos anchos, ópticamente delgados, separados por zonas gruesas. Los fragmentos que componen el anillo C puedan alcanzar dimensiones de hasta 2 m. La estructura está muy ordenada, pero de momento no se puede explicar con las resonancias gravitacionales.

El anillo B abarca la mayor parte del sistema de anillos; tiene una anchura de más de 25.000 km y es la zona más brillante. Observado más de cerca, se divide en numerosas estructuras anulares brillantes y agujeros oscuros, que pueden tener hasta 100 km de extensión. Se halla nítidamente delimitado con el anillo C. El «agujero» que se abre en la parte exterior, denominado división de Cassini, no está vacío. En él se han encontrado cinco bandas menos brillantes. Las partículas del anillo C y de la división mencionada son bastante más oscuras que las de los anillos A y B. Por otra parte, el borde interno de la división parece corresponder al lugar donde se localiza la resonancia gravitacional 2:1 con la luna Mimas.

En la parte exterior se encuentra el anillo A, en cuyo interior se localiza la división de Encke. A pesar de que el anillo A parece más uniforme, existen también estructuras finas y fragmentos de hasta 8 m de diámetro. La división de Encke tampoco está «vacía».

Más allá del anillo A se halla otra estructura muy interesante. El anillo F, descubierto por la sonda Pioneer 11, está entre las órbitas de las lunas S14 y S13 (v. tabla 8-1), esto es, a unos 3.600 km del borde exterior del anillo A. Estas dos lunas tienen órbitas ligeramente excéntricas: la distancia de S13 con respecto al anillo varía entre 500 y 2.000 km. S14 se mueve a 500 km del anillo F por su parte interior. El propio anillo F parece tener también una cierta excentricidad (su posición oscila en unos 400 km). En realidad, parece estar compuesto de tres anillos, de los cuales los dos exteriores se hallan «retorcidos». Se distinguen cinco puntos de intersección separados unos 700 km entre sí. Aparte de eso, cada 630 km se aprecia una especie de «nudos». Todas estas estructuras se ponen en

relación con la influencia de la fuerza de gravitación de ambos satélites. Así, una luna que se encuentra a gran distancia del planeta se moverá más despacio que otra que se halle cerca del mismo. Una partícula cuya velocidad se acelera se moverá en una órbita más baja y una luna que se mueve dentro de un anillo atraerá las partículas de éste, las frenará y, por ello, las situará en una órbita superior. Por el contrario, una luna que se mueve fuera del anillo acelerará las partículas que quieren escapar hacia el exterior y las situará en una órbita más baja. Así pues, estas lunas «cuidan» de las partículas de polvo como el perro pastor cuida del rebaño.

Más hacia el exterior (a 170.000 km de radio) se encuentra el anillo G, que en las fotografías aparece como una delgada estructura apenas visible. Parece tratarse de un anillo muy delgado. Entre 210.000 y 300.000 km de radio hallamos el anillo E, que se supone está compuesto de material muy fino. En las proximidades de la órbita de Encelado, el anillo tiene su mayor densidad: presumiblemente Encelado es la fuente del polvo más fino. Se podría pensar en efectos de marea producidos por la interacción gravitatoria con la luna Dione.

Por último, se observan también unas estructuras radiales denominadas «radios». Se trata de estructuras del anillo B observadas en su mitad exterior. No son variaciones de densidad, sino zonas más claras que siguen una dirección radial. Por ello se las ha relacionado con el efecto de los campos magnéticos, y en los numerosos detalles difíciles de explicar por las resonancias gravitacionales se ha recurrido también al efecto de las fuerzas electromagnéticas. Esto resulta evidente, pues se ha comprobado la existencia de emisiones electromagnéticas en la zona del anillo (anillo B) que podrían proceder, por ejemplo, de las descargas de partículas cargadas eléctricamente (por fotoionización o por efecto del plasma).

La temperatura de color de los anillos se calculó con un espectrómetro de infrarrojos a bordo de la sonda Voyager. En el lado iluminado del sistema de anillos se obtuvo una temperatura de 70-75°K, mientras que la parte no iluminada del anillo A tiene 50-60°K, el anillo B 50°K y el anillo C 85°K.

Desde el paso por las proximidades de Júpiter se sabe de la existencia de un anillo de polvo alrededor de este planeta (v. fig. 8-10); alrededor de Urano se han detectado once anillos, e incluso alrededor de Neptuno se han encontrado dos anillos. Estos anillos son oscuros; el material fino (de aprox. µm) indica que se trata de un material de poca antigüedad (6 millones de años).

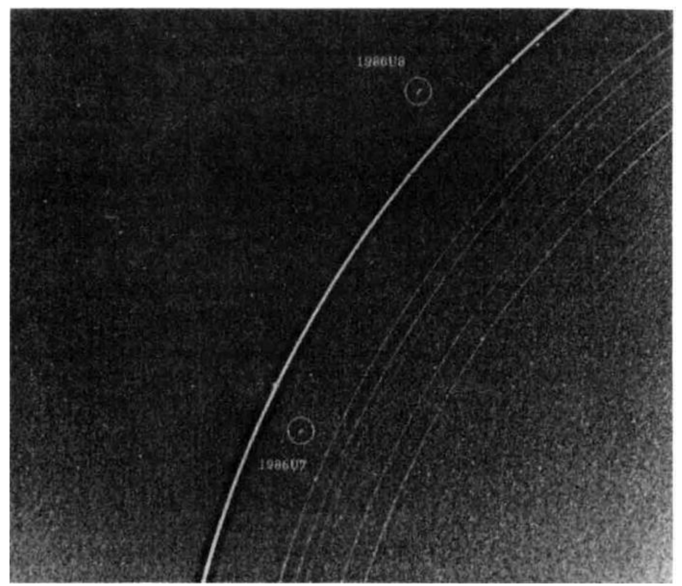


Fig. 8-11. La anchura y la profundidad óptica varían a lo largo de los anillos de Urano. Las partículas que forman los anillos tienen un albedo bajo, lo que hace suponer que posiblemente se trate de pequeños granos de polvo (de aprox. pm). Sin embargo, esto significa que tienen una vida corta y, por tanto, implica la existencia de una fuente local.

La primera teoría sobre la formación de un sistema de anillos la desarrolló el matemático francés E. Roche en 1847. Demostró que a una determinada distancia radial del planeta, denominada «radio de Roche», una luna (poco compacta) se desintegra por el efecto de marea. Este radio de Roche se obtiene como producto del radio del planeta con un factor (2,44) y la

raíz cúbica de la producción de las densidades del planeta y el satélite. La densidad de Saturno es de 0,7 g/cm^3 y la de un conglomerado de polvo y hielo de 1 g/cm^3, por lo que cabría esperar que los anillos de Saturno estuvieran dentro de 2,3 radios de Saturno (R_S). Y así es: el anillo exterior F se encuentra a 2,35 R_S (v. también pág. 50).

Se calcula que la masa de los anillos de Saturno es de 3×10^{-6} la masa del planeta. El espesor de los anillos en sentido perpendicular al plano de los mismos oscila entre 0,8 y 2,8 km. Las partículas se componen probablemente de hielo de agua con núcleos que quizá procedan de material meteórico y que presentan unas dimensiones de algunas mieras hasta 20 m de radio (no mayores).

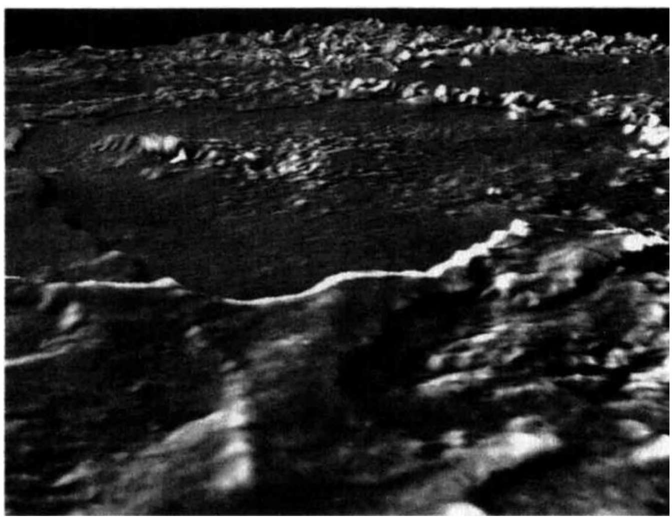


Fig. 8-12. Imagen en perspectiva de un accidente de la superficie de Tritón, semejante a una caldera, generada por ordenador gracias a técnicas de «fotoclinometría» (determinación de las estructuras a partir de la geometría de las sombras). En este caso se aumentó mucho la dimensión vertical. El relieve tiene, en realidad, una altura de 1 km, el diámetro del cráter de impacto en el centro de la imagen es de 13 km, mientras que el diámetro de toda la zona, muy llana, que se formó presumiblemente durante una erupción volcánica, es de 200 km. La lava de hielo eyectada debió de ser muy viscosa.

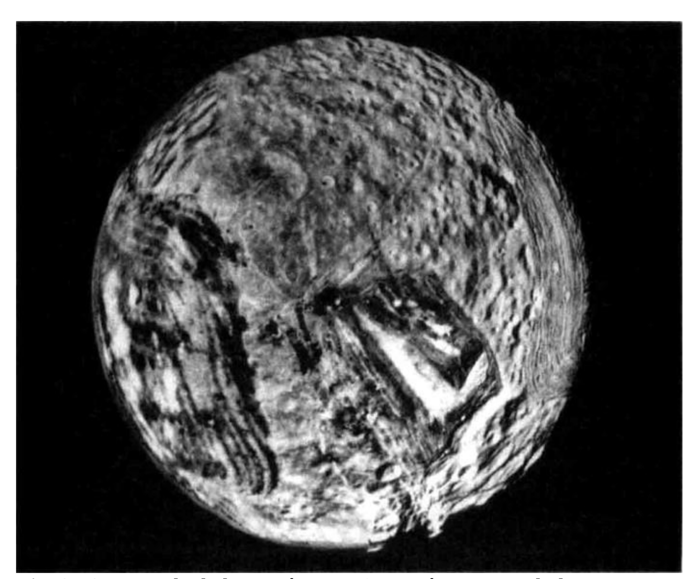


Fig. 8-13. Miranda, la luna más pequeña y más cercana al planeta Urano, sorprende a causa de la gran variedad de su actividad tectónica, aunque su temperatura superficial sea de tan sólo 86°K. La fricción debida a los fenómenos de marea tiene que haber hecho aumentar su temperatura interior. Existe una zona antigua, que presenta un gran número de cráteres de impacto, y un terreno muy joven, atravesado por bandas oscuras. Las trayectorias de las lunas de Urano (v. tabla 8-1 para las excentricidades e inclinaciones) hacen pensar en complejos procesos de evolución de las órbitas, incluida la fricción debida a los efectos de marea.

En 1980 se observó desde el «Kuiper-Airborne-Observatory» el paso de Urano por delante de una estrella (v. fig. 8-9). Se apreció un debilitamiento de la luz de la estrella antes de que el disco del planeta la ocultara, lo que permitió deducir la existencia de nueve anillos. El paso de la sonda Voyager permitió confirmar la existencia de los nueve anillos y descubrir la de dos más, todos ellos de tan sólo 10-100 km de anchura (v. fig. 8-11). Las estimaciones dieron como resultado una masa de 5×10^{18} g y una densidad de aproximadamente 3 g/cm^3. Debido a su reducido albedo (de aprox. 0,05) se las considera partículas de polvo condrítico sin revestimiento de hielo (lo que

hace que los anillos de Saturno sean más brillantes). Estos anillos se encuentran dentro del radio de Roche. Sin embargo, debido a que las resonancias gravitatorias con las lunas se encuentran fuera del radio de Roche, este efecto no permite explicar la existencia de los huecos que hay entre los anillos. Por esta razón se considera que existen motivos para poner en cuestión el efecto de las resonancias gravitatorias en el caso de los anillos de Saturno.

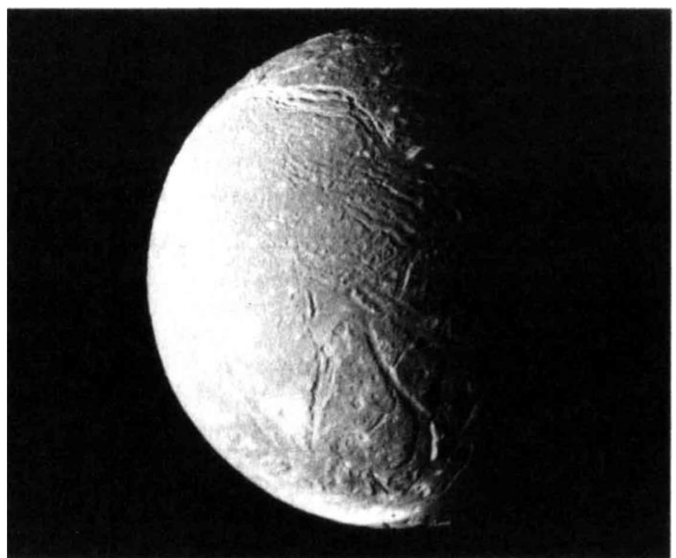


Fig. 8-14. La superficie de Titania muestra, al igual que la de Ariel, cráteres no muy antiguos y se parece extraordinariamente a la de Oberón. La superficie está atravesada por innumerables pliegues, cuya anchura oscila entre 20 y 50 km, y cuyas profundidades van desde los 2 a los 5 km. Dichas estructuras aparecieron presumiblemente por calentamiento debido a los choques con fragmentos rocosos en la órbita alrededor del planeta.

Por el borde exterior del anillo de Júpiter (fig. 8-10) discurre una luna que limita evidentemente el anillo hacia el exterior. En Saturno se encontraron también estos «satélites pastores» dentro y fuera de algunos anillos, igual que sucede en

Urano (fig. 8-8). Al parecer, existen pequeños «satélites pastores» allí donde hay anillos con contornos muy claros, si bien no siempre se pueden ver debido a que son o muy pequeños o muy oscuros, o ambas cosas a la vez. El anillo de Júpiter (fig. 8-10), observado por así decirlo desde la cercanía por la sonda Voyager, está formado muy probablemente por polvo fino, cuyos granos tienen un diámetro medio de 4 pm, si bien entre ellos pueden aparecer también fragmentos mayores. Alrededor de Neptuno se descubrieron cuatro anillos estrechos formados por material muy fino (v. fig. 8-8).

La luna descubierta en el borde exterior del anillo hizo suponer que, en Júpiter, éste podría haberse formado gracias a un proceso de «sputtering», es decir, debido al desprendimiento de polvo procedente de la propia luna. W. H. Ip, del Instituto Max Planck de Lindau/Harz, predijo la existencia del anillo de Júpiter, antes de que fuera descubierto, debido a que el flujo de partículas cargadas del cinturón de radiación presentaba en este punto un comportamiento que sólo podía explicarse suponiendo la presencia de un anillo (absorbente).

Los anillos pueden surgir y desaparecer de diferentes modos. Comencemos por el final: los choques de las partículas de polvo del anillo determinan eventualmente la formación de fragmentos o la salida de las partículas. Los micrometeoritos que bombardean continuamente las partículas de polvo pueden, por un lado, crear nuevas partículas, pero, por otro, también contribuyen al acortamiento de la vida del sistema de anillos; ello depende del proceso que prevalezca. Por eso no hay que descartar tan fácilmente la posibilidad de que la Tierra haya tenido un anillo de polvo. La formación de los anillos resulta más difícil de explicar. Existen varias hipótesis al respecto. Unas hablan del efecto de marea de cuerpos poco compactos, otras del polvo procedente de la formación de la Luna, de la fase de gas. Desde el punto de vista dinámico los anillos sólo pueden ver la luz cuando existen partículas. En relación con su teoría sobre el origen de los planetas (v. cap. IX), Hannes Alfvén ha discutido también la formación de los anillos, partiendo de la base de que el gas ionizado se puede condensar en polvo. Este polvo, cargado eléctricamente, es atraído luego por

el campo magnético de un planeta, en consecuencia, los anillos serían acumulaciones de material formado a gran distancia. Alfvén puso en duda desde un principio la explicación de las «divisiones» por la resonancia gravitacional.

Como se explicará con mayor detalle en el próximo capítulo, la simple cuestión acerca de la formación de los anillos oculta consecuencias de gran calado que afectan el origen de las lunas, de los planetas y del propio Sistema Solar.



Lámina 1. Imagen del planeta Marte tomada desde la sonda Viking 1 el día 18 de junio de 1976. Es el resultado de superponer tres imágenes tomadas con filtros rojo, verde y violeta a intervalos de 9 s. Cerca del centro de la imagen se observa en el terminador el cráter Argyre. Las zonas más claras de los polos corresponden a los casquetes de hielo. Las estructuras alargadas conforman el Vallis Marineris, el «Gran Cañón» de Marte.

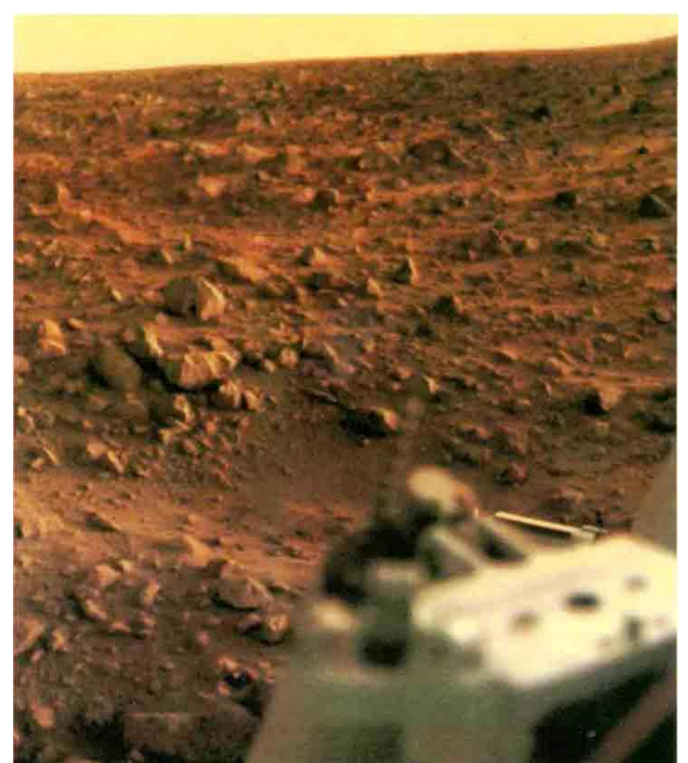
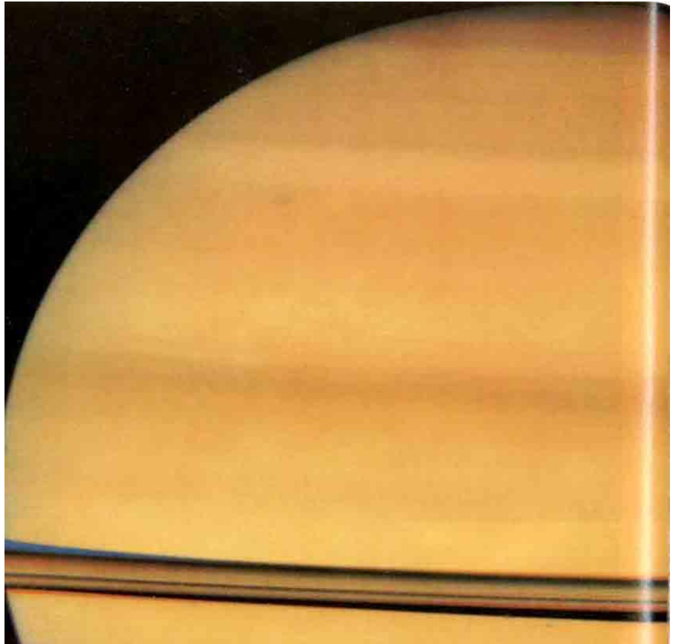


Lámina 2. Imagen tomada en el lugar de aterrizaje del Víking-Lander 1 en Marte, el día 21 de agosto de 1976. El Sol está bajo un ángulo de elevación de 3-4 grados sobre el horizonte. Las rocas tienen dimensiones de 30 cm (media). Las sombras difusas se deben a la dispersión de la luz en la polvorienta atmósfera de Marte.



Lámina 3. Júpiter. Fotografía realizada el 5 de febrero de 1979 por la sonda estadounidense Voyager 1 desde una distancia de 28,4 millones de km. Se observan la Gran Mancha Roja y dos de las cuatro lunas de Galileo: Ío está delante del disco del planeta, Europa a la derecha de la imagen.



Lamina 4. Saturno. Fotografía realizada por la sonda estadounidense Voyager 1 desde una distancia de 1,75 millones de km, el 11 de noviembre de 1980. Al igual que en el caso de Júpiter, las nubes determinan una estructura de bandas. Las manchas que se aprecian en la parte superior de la fotografía fueron visibles durante varias semanas. Los vientos alcanzan en las capas nubosas velocidades de hasta 60 m/s (216 km/hora). En el borde inferior se aprecia el sistema de anillos visto longitudinalmente.

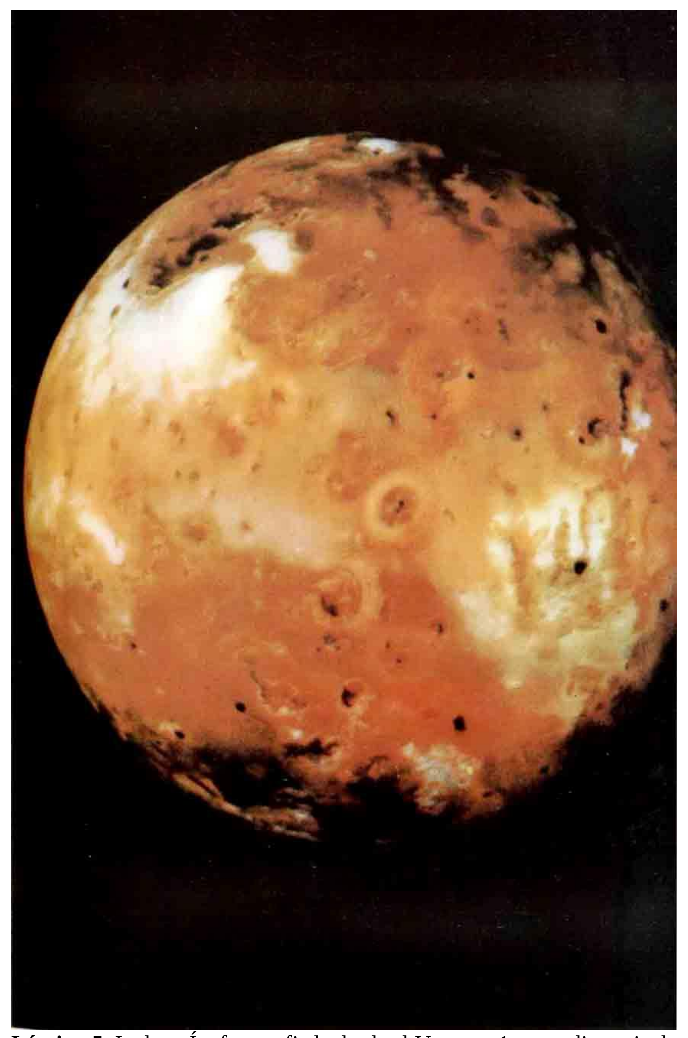


Lámina 5. La luna Ío, fotografiada desde el Voyager 1 a una distancia de 862.000 km.

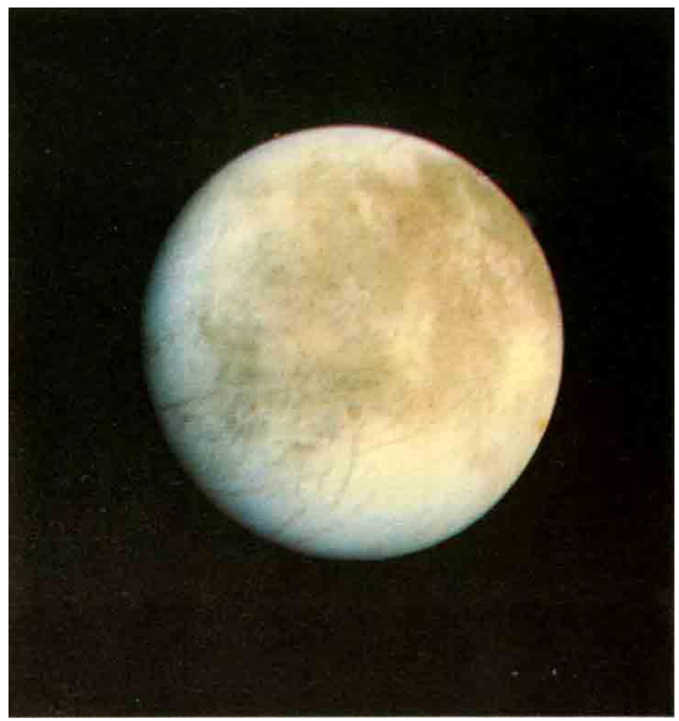


Lámina 6. Europa, la más pequeña de las lunas de Galileo, fotografiada desde el Voyager 1 a una distancia de 2 millones de km.



Lámina 7. Ganimedes, la luna más grande de Júpiter, 1,5 veces mayor que nuestra Luna, fotografiada desde el Voyager 1 a una distancia de 2,6 millones de km.



Lámina 8. La superficie de Ío enfocada a 377.000 km de distancia. Las zonas rojizas, blancas y negras son, probablemente, precipitaciones de sales y azufre, y es muy posible que tengan un origen volcánico. Dado que la superficie no presenta cráteres de impacto, el satélite debe ser relativamente «joven».

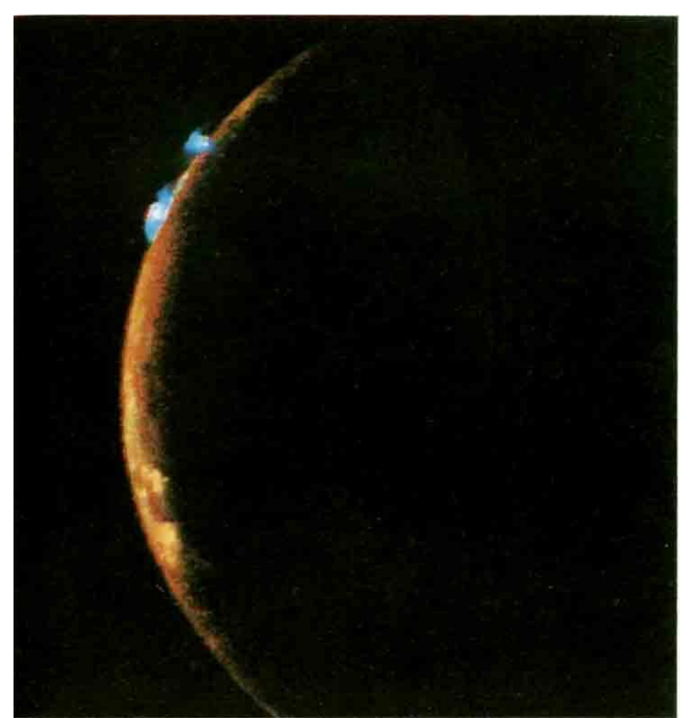


Lámina 9. Fotografía de Ío realizada el 9 de julio de 1979 desde el Voyager 2 a una distancia de 1,2 millones de km. En el borde del disco de la luna se observan, en tonos azulados, las columnas de material lanzado por dos erupciones volcánicas. Estos volcanes fueron observados ya por el Voyager 1, por lo que mantuvieron su actividad durante al menos 4 meses. En total se han registrado 8 erupciones volcánicas.

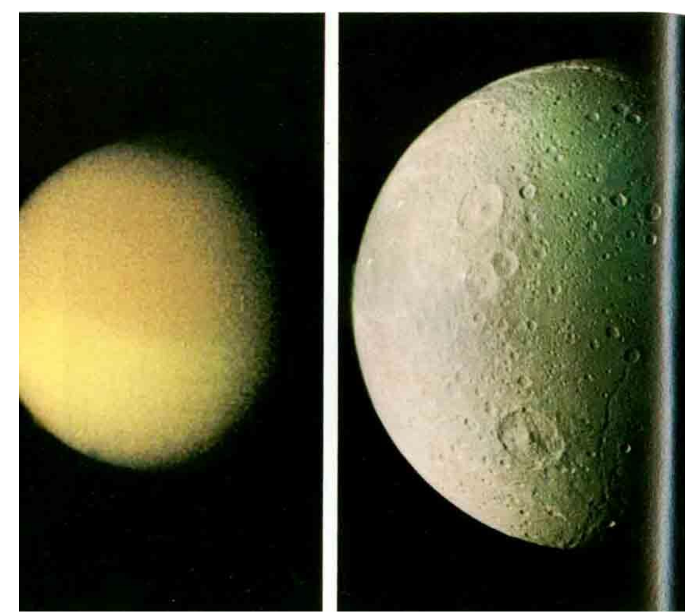


Lámina 10. Fotografías de las lunas de Saturno realizadas desde las sondas Voyager. De izquierda a derecha: Titán (9-11-1980), desde 4,5 millones de km de distancia; Dione (9-11-1980), desde 4,2 millones de km de distancia.



Lámina 11. Fotografías de las lunas de Saturno realizadas desde las sondas Voyager. De izquierda a derecha: Rea (11-11-1980), desde 1,196 millones de km de distancia; Japeto, fotografiada por el Voyager 2 (22-8-1981) desde 1,1 millones de km de distancia.

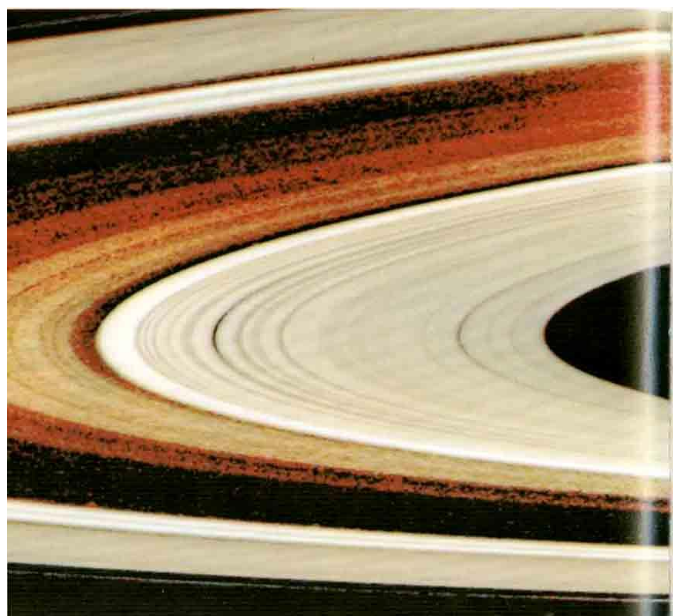


Lámina 12. Los anillos de Saturno. La fotografía se realizó el 6 de noviembre de 1980 desde el Voyager 1 a una distancia de 8 millones de kilómetros. Se pueden observar casi 1.000 estructuras concéntricas distintas. Las denominadas «divisiones» (es decir, los espacios entre los anillos) tampoco están vacías, ya que se hallan llenas de materia. En la parte superior de la imagen se observa a la izquierda el anillo F, de 150 km de extensión, descubierto por la sonda Pioneer 11.

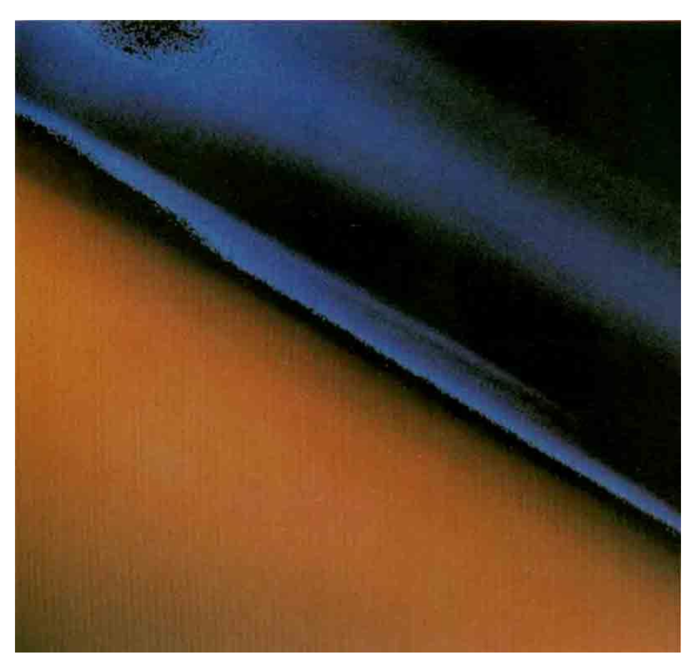


Lámina 13. Fotografía de Titán realizada el 12 de noviembre de 1980 desde 22.000 km de distancia. Las estructuras azules son velos de polvo localizados a altitudes de 200, 375 y 500 km. La parte superior del grueso aerosol del borde de la luna aparece rojiza.



Lámina 14. La fotografía de la atmósfera de Júpiter, realizada por la sonda Voyager 2 desde una distancia de 6 millones de km, muestra el entorno de la Gran Mancha Roja. Al sur de ella se había formado una nueva estructura nubosa de color blanco. Esta estructura nubosa impide que los pequeños remolinos que se aprecian a la izquierda de la imagen rodeen la GMR. Hay que imaginar estas estructuras en un espacio tridimensional: las estructuras oscuras se encuentran más profundas que las claras.

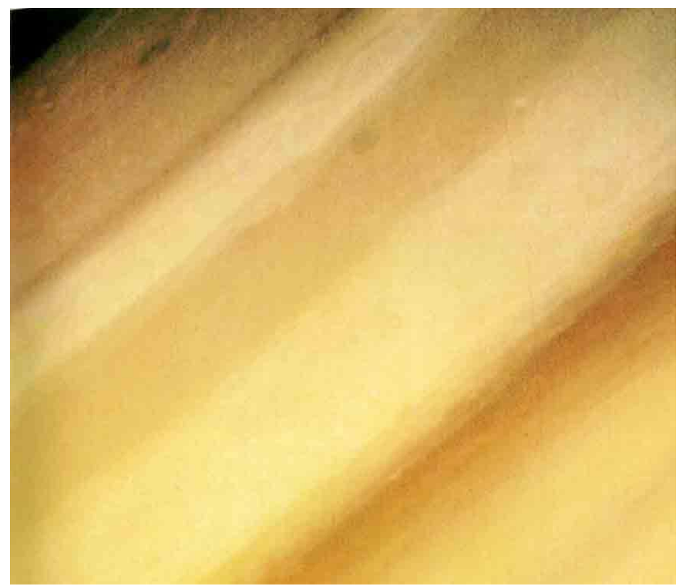


Lámina 15. Fotografía de la capa de nubes de Saturno en el hemisferio norte, entre 40 y 60° de latitud, realizada desde una distancia de 7,5 millones de km por la sonda Voyager 1, el día 7 de noviembre de 1980. Los óvalos marrones son estructuras turbulentas similares a la Gran Mancha Roja de Júpiter.



Lámina 16. Imagen compuesta a partir de 6 fotografías tomadas en marzo de 1986 desde una distancia de entre 14.420 y 2.730 km del cometa con la cámara instalada a bordo de la sonda cometaria Giotto. La máxima resolución es de 60 m por pixel. El Sol se encuentra a 29° por encima de la horizontal en la parte izquierda de la imagen y 12° por debajo del plano de la imagen. Se reforzó la visibilidad de las partes oscuras del núcleo gracias a la aplicación de la técnica de enmascaramiento.

IX. EL ORIGEN DEL SISTEMA SOLAR. SU FINAL

Una vez que hemos visto cómo «funciona» el Sistema Solar y cómo son los cuerpos que lo integran, es preciso preguntarse por su origen.

Comencemos con una breve introducción histórica. Todas estas cuestiones han dado lugar a una serie de teorías con un carácter generalmente especulativo. También en lo que se refiere al origen del Sistema Solar. Las más conocidas son las de Immanuel Kant (1755) y Pierre Simon Laplace (1796) (v. también apéndice 1). Laplace consideró que los dibujos de galaxias que el astrónomo William Herschel había realizado basándose en sus observaciones correspondían a sistemas solares. A pesar de partir de una base errónea, la teoría sigue todavía vigente y ha sido completada, por ejemplo, con las explicaciones sobre el colapso gravitacional. Las teorías modernas presentan también este carácter especulativo, circunstancia que el premio Nobel sueco Hannes Alfvén no se cansa de mencionar.

Por ello vamos a centramos en lo sucesivo en hechos y observaciones y especialmente en los relacionados con la cosmoquímica, disciplina que permite abordar directamente estas cuestiones.

Todas las teorías tienen que explicar algunas características elementales del Sistema Solar, como las siguientes:

1. Las órbitas de los planetas se encuentran casi todas en el plano de simetría del sistema.
2. Las órbitas de los planetas son casi circulares.
3. La dirección del movimiento de todos los planetas en su órbita es «directa» (mirando en sentido longitudinal desde el norte, en el sentido contrario al de las agujas del reloj), como el sentido de rotación del Sol.
4. El sentido de la rotación de (casi) todos los planetas en torno a su eje de rotación es también directo.

5. Las densidades de los planetas disminuyen desde el interior hacia el exterior (fig. 3-8), lo mismo que en las lunas de los sistemas de Júpiter, Saturno y Urano.

Los puntos 1-4 sirven de base a las hipótesis de la condensación. No existe ningún otro fenómeno físico que pueda determinar estas características sin la influencia del exterior. Uno de los principales problemas planteados a la hora de comprender la naturaleza del Sistema Solar es el hecho de que el Sol representa el 99,9% de la masa del sistema, pero sólo el 2% del impulso de giro global. La rotación solar es característica de las «estrellas de la secuencia principal» (v. más adelante), por lo que la «separación» de masa e impulso de giro en la formación de un sistema de este tipo tiene que basarse en un importante proceso físico.

Además hay que explicar otros seis aspectos importantes.

1. Si se compara la frecuencia de los isótopos[15] de algunos elementos en diversas regiones cósmicas —en el espacio interestelar, en el Sol, en los planetas— se obtiene como proporción de las frecuencias de deuterio e hidrógeno en los planetas y en el espacio interestelar 3×10^{-5}, pero en el Sol sólo 3×10^{-7}. La proporción entre litio y silicio en el espacio interestelar y en los planetas es de 3×10^{-5}, siendo en el Sol unas cien veces menor, aun cuando la frecuencia relativa de hierro y silicio sea igual en los tres ámbitos.
2. La edad de los planetas se calcula, con un margen de error de 100 millones de años, en 4.600 millones de años (la edad del Sol no se puede calcular directamente). Este hecho excluye definitivamente los modelos sobre el origen del Sistema Solar que se basan en una misma composición del Sol y los planetas, así como los modelos que sostienen que los

[15] Los isótopos de un elemento químico se diferencian por el número de neutrones en el núcleo. Esto no altera las características químicas del elemento. Sin embargo, algunos de estos isótopos no son estables y experimentan una desintegración radiactiva. Estos núcleos pueden sufrir alteraciones químicas por la emisión de componentes del núcleo (protones, partículas alfa).

planetas surgen del Sol en virtud de la presencia de una estrella que pasa «cerca», siendo «arrancados» por una violenta marea (hipótesis de Jean Buffon).

3. Con ello se sitúa en el centro de todas las consideraciones la hipótesis de la condensación, discutiéndose al respecto en la actualidad numerosos detalles. Si consideramos las nubes de gas interestelar llegamos al tercer punto que hay que explicar: las nubes están demasiado calientes como para condensarse. Por ello se precisa un eficaz proceso de enfriamiento.
4. El campo magnético presenta en el espacio intergaláctico una intensidad de 3 micro-gauss Una nube de gas en contracción «se lleva el campo magnético»: con ello aumenta la intensidad del campo y se hace más lenta la contracción, de tal forma que la nube de gas se vuelve «elástica». Por tanto, las nubes de gas no pueden condensarse si no se «liberan» de su campo magnético. La cuestión es cómo ocurre esto. Una nube de gas toma parte en la rotación diferencial del Sistema Solar, por lo que cuenta con un impulso de giro.
5. Si se independizara, esto es, si se aislara del exterior, el impulso de giro se mantendría constante según una ley física. La cantidad de movimiento en línea recta es el producto de la masa y la velocidad. En el movimiento de rotación corresponde al impulso de giro, definido como el producto del momento de inercia de un cuerpo y su velocidad angular. Si una nube se contrae, su momento de inercia disminuye (como el patinador sobre hielo que al hacer una pirueta acerca poco a poco los brazos al cuerpo): por consiguiente, con un impulso de giro constante aumenta la velocidad angular y la rotación es más rápida. Las nubes de gas galácticas tienen un impulso de giro tan alto que no pueden condensarse. Así pues, hay que preguntarse: ¿cómo se suprime el impulso de giro?
6. En último lugar, hay que explicar la ley de Titius-Bode (v. apéndice 3), que se puede predicar tanto del sistema planetario como de los sistemas de lunas de Júpiter, Saturno y Urano. Se trata de una serie geométrica con el factor 1,73 que está modulada con una función periódica. Si se divide la formación del Sistema Solar en tres períodos —período del disco (cuando la nube de gas adoptó una forma aplanada,

de disco), períodos de la agregación (cuando se constituyeron el Sol y quizás algunos cuerpos planetesimales) y período de los planetas (cuando se formaron los planetas)— se puede pensar que la serie geométrica tiene su origen en el primer período (la teoría de las turbulencias de Weizsäcker contempla también una serie de este tipo) y que la función periódica es una consecuencia de los efectos gravitacionales que aparecieron en el tercero.

Hemos visto que la «nube de gas» es no sólo el principio más plausible, sino también el más correcto desde el punto de vista físico, para explicar el origen del Sistema Solar Pero antes de profundizar en este proceso vamos a hacer unas breves consideraciones sobre sus antecedentes. La hipótesis del «Bing bang» o «estallido primario» ocupa en la actualidad un lugar muy importante en la cosmología Se basa, por un lado, en el descubrimiento del cosmos en expansión (V. H. Slipher, 1913) —ley de Hubble—, que está en consonancia con una solución de las ecuaciones que definen la teoría de la gravitación general de Einstein (De Sitter). Por otro lado, los norteamericanos Amo Penzias y Robert Wilson, de los laboratorios Bell, descubrieron en 1965 la «radiación térmica de fondo», cuya temperatura de 3ºK corresponde a una longitud de onda (en el máximo de intensidad) de aproximadamente 1 mm: se considera, que esta radiación es la radiación residual del estallido primario que se enfrió en el cosmos en expansión, tal como predijo George Gamow. Esta observación se relaciona directamente con el origen del Cosmos, el estallido primario, la creación de la nada. Tanto la una (expansión) como el otro (estallido primario) están por encima de nuestra imaginación. El carácter especulativo de esta teoría radica en la extrapolación, en la aplicación de conceptos conocidos en terrenos se encuentran más allá de nuestra experiencia. La física de las últimas décadas no ha ignorado este método. Así, el modelo atómico de Bohr (1913) es una extrapolación (genial) de este tipo. Sus precursores —los modelos atómicos de J. J. Thomson (1898), P. Lenard (1903), H. Nagaoka (1904) y E. Rutherford (1911)— eran todos erróneos. Trataron de modificar «correctamente» los conceptos e ideas

tradicionales, con lo que los resultados experimentales adquirieron un significado muy diferente. Por consiguiente en la actualidad hay que contemplar con escepticismo las tesis cosmológicas. Por lo demás, es necesario analizar la isotropía de esta radiación (que incide en todas direcciones con la misma intensidad). En esto podría consistir un test crítico de la hipótesis del estallido primario. Hay que imaginar que todas las estrellas se mueven en un mar de fotones, cien millones de veces más numerosos que los nucleones, las partículas elementales del átomo. Habrá de suprimirse nuestro movimiento en relación con el mar de fotones para comprobar si la radiación, valorada desde los demás sistemas de referencia, es realmente isótropa. Esta tarea resulta sumamente difícil desde el punto de vista técnico. La NASA proyecta lanzar en la década de los ochenta un satélite para estudiar esta radiación de fondo («Cosmic-Background-Explorer»), Nuestras ideas sobre el origen de las estrellas son también hipotéticas. La astrofísica sólo nos da una visión directa de la evolución, y por lo que parece se han descubierto posibles «lugares de nacimiento de las estrellas», como la nebulosa Orión.

La vida de una estrella se desarrolla en gran parte de un modo ordenado: las reacciones nucleares garantizan el abastecimiento de energía. La evolución depende de la masa, de tal forma que las estrellas con mucha masa viven de una manera en cierto modo más intensa, por lo que duran menos (sólo algunos millones de años), mientras que las más pequeñas se mantienen durante más tiempo (varios miles de millones). A lo largo de su evolución las estrellas pierden una parte considerable de su masa en forma de radiación, de vientos estelares o de explosiones. Por eso se piensa en la actualidad que el polvo interestelar procede de las estrellas y no se condensó a partir del gas. Al final de la evolución se produce una crisis de energía: la energía nuclear se ha consumido, y la estrella no puede liberar más energía por contracción gravitacional Se convierte entonces —según su masa— en una enana blanca (como la acompañante de Sirio) o en una estrella de neutrones (como el pulsar en la nebulosa de Cáncer). Es posible que las estrellas con más masa acaben como «agujeros negros».

Las estrellas se forman a partir del material existente en el lugar en el que surgen. Por consiguiente, una nube de gas colapsada tendría que mostrar la misma composición química que la materia del lugar en donde se encuentra. Si la composición química del material del Sistema Solar es el resultado de su evolución, las primeras estrellas tuvieron que estar formadas de hidrógeno y helio («progenitores»). Probablemente tuvieron tanta masa que se «extinguieron» en seguida y explotaron, con lo que su materia se mezcló con la del entorno Las estrellas posteriores se han tenido que formar con material que antes ya había pertenecido a una estrella. Al repetirse este proceso aumenta progresivamente el contenido de materia estelar «antigua» en el gas y el polvo interestelar Con ello, las estrellas cambian continuamente, despacio, pero de modo sistemático. Se piensa que las estrellas jóvenes que se forman en la actualidad en un cúmulo estelar presentan características distintas que las que nacieron hace 10.000 millones de años. (Un estudio de este tipo podría convertirse también en un test de la hipótesis del estallido primario.) En consecuencia, no se puede esperar que la composición de la materia interestelar sea la misma en todos sitios: presenta variaciones locales.

¿Cómo es el material que ya era antes materia estelar? La física moderna ofrece una respuesta que, por su importancia, vamos a resumir a continuación Dado que en las estrellas la producción de energía se alimenta de la desintegración de núcleos atómicos, la composición química de una estrella está en función del tiempo las más jóvenes tienen una composición química distinta de la de las más viejas Las observaciones realizadas han confirmado este hecho. Consideremos los elementos químicos que nos son conocidos. Sus núcleos atómicos están compuestos de Z protones con carga eléctrica y N neutrones eléctricamente neutros, ambos aproximadamente de la misma masa. Si se designa con la letra A a la masa del núcleo (peso atómico), entonces A = N + Z. En la figura 9-1 se representan N y Z en un eje de coordenadas. La línea diagonal corresponde a los elementos químicos cuyos núcleos están compuestos de igual número de protones y neutrones. El sombreado representa la zona donde se encuentran los núcleos que aparecen en

la naturaleza. Se aprecia claramente que según aumenta el peso atómico se vuelven más estables los núcleos que tienen un exceso de neutrones. En cambio, con pesos atómicos reducidos, en los núcleos estables existe el mismo número de protones y neutrones. La zona sombreada tiene una determinada anchura porque siempre existen núcleos con número másico par e impar AI formarse núcleos por captura de neutrones (proceso s. se verá más adelante) se reducen los núcleos con número másico impar, no en vano su promedio de captura de neutrones es bastante mayor. El perfil de diente de sierra de la figura 9-2 indica que este proceso ha tenido que influir de modo persistente en la materia del Sistema Solar. A ello se une la estabilidad general de los núcleos En el apéndice 7 se explica todo esto con más detalle.

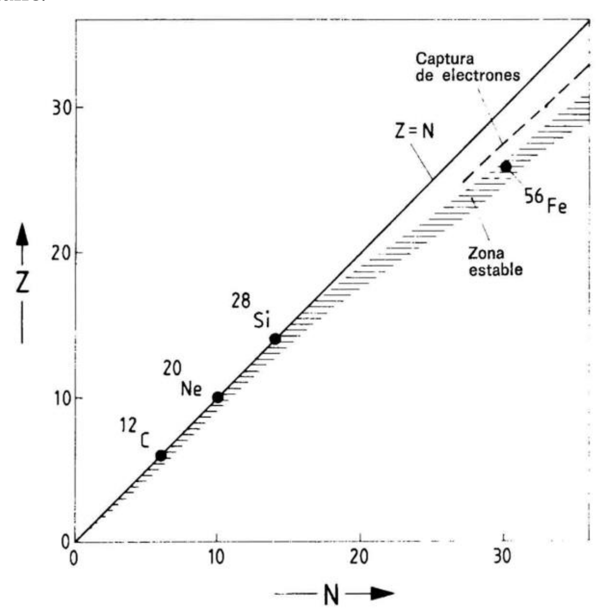


Fig. 9-1. Los elementos químicos. Z: número de protones en el núcleo, numero atómico o numero ordinal. N: número de neutrones en el núcleo. En la zona sombreada se encuentran los elementos estables. La línea a trazos corresponde a núcleos que, tras su formación, pueden pasar a la zona estable por captura de electrones.

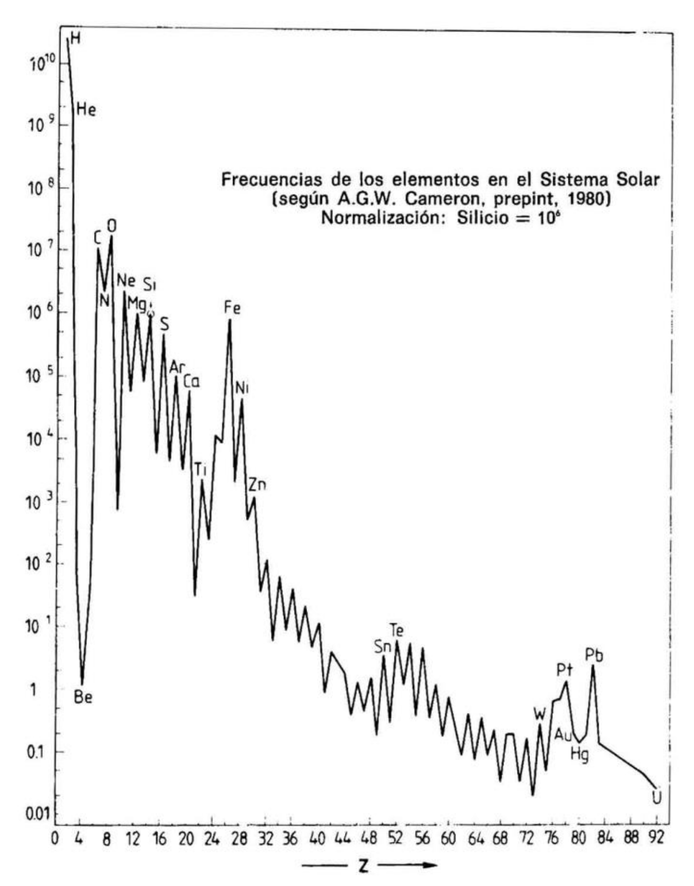


Fig. 9-2. Frecuencia de los elementos en el Sistema Solar (según Cameron). Estas frecuencias se establecieron a partir de material meteórico. En sentido horizontal se representa el número ordinal Las frecuencias están normalizadas, estableciéndose arbitrariamente la frecuencia del silicio = 10^6.

El hidrógeno y el helio son mucho más frecuentes que todos los demás elementos, como se aprecia en la figura 9-2. Esto hace suponer que el mecanismo de formación de los dos elementos más ligeros tiene que ser totalmente diferente del de los

demás. Al observar la figura 9-2 llama la atención la ausencia casi total de litio, berilio y boro. La tesis más plausible es que estos elementos se forman realmente de modo diferente a los demás, en el curso de procesos muy poco frecuentes. El diagrama muestra también la existencia de grupos de elementos con frecuencias similares. Parece indicado considerar este comportamiento como una especie de «parentesco» en el que los elementos de cada grupo tendrían en común su origen. El carbono y el oxígeno ocupan una posición especial. Sigue a continuación el grupo de los elementos con número másico inferior a 40 (calcio, argón), el grupo del hierro y, por último, el de los núcleos pesados.

¿De qué tipo son estos procesos en los que se sintetizan los elementos? Los científicos E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler y F. Hoyle trataron .esta cuestión por primera vez en un artículo publicado en 1957 en la prestigiosa revista «Review of Modem Physics». La síntesis es posible cuando se dan ocho procesos diferentes.

1 La «combustión del hidrógeno» («fusión») se produce, por ejemplo, en el Sol. A partir de protones y en reacciones liberadoras de energía, a una temperatura de 15 millones de grados se forman, en un espacio de tiempo de 10^6 ... 10^{10} años, helio, carbono, nitrógeno, oxígeno, flúor, neón y sodio.
2. A partir de la «combustión del helio», que tiene lugar a 100 millones de grados, con densidades de 10^5 g/cm^3 y con constantes temporales de 10 a 100 millones de años, se forman carbono, oxígeno, neón y magnesio (números másicos 12, 16, 20, 24). Se supone que este proceso se desarrolla cuando una estrella ha llegado a la «rama de las gigantes» (v. más adelante).
3. Masas de hasta 44 o 48 (titanio 48) se producen en el «proceso α», esto es, en reacciones desencadenadas por partículas α; se supone que estas partículas se forman a partir del neón, con un número másico 20 por fotodesintegración (temperatura: mil millones de grados; duración: 10^2-10^4 años).

4. El grupo del hierro (masa 50-60) se sintetiza en el «proceso e» (equilibrio) con altas temperaturas (más de mil millones de grados) y densidades elevadas. Las constantes temporales para estos procesos son ~min; el proceso tiene lugar poco antes de la explosión de una supernova.
5. A partir del grupo de elementos formado en (4) se producen núcleos más pesados en el «proceso p» por captura de protones o salida de neutrones. Las escalas temporales son como en el «proceso r» (7).
6. La captura de neutrones se puede producir de modo que la distancia entre ambas reacciones resulte grande en comparación con el período de semidesintegración de la mayoría de los núcleos radiactivos, con lo que generalmente se produce antes la desintegración p (esto es, la eliminación de electrones). Como resultado de estos «procesos s» (s:«slow», despacio) pueden formarse núcleos de número másico 63 hasta bismuto, de número másico 209, todos ellos en la «zona de estabilidad» (zona sombreada de la figura 9-1), así como núcleos con número másico entre 23 y 46. Este proceso se espera que se verifique en las estrellas gigantes rojas y debería durar aproximadamente 10^7 años.
7. La captura de neutrones también se produce de un modo extremadamente rápido cuando existen tantos neutrones que los núcleos pueden capturar cuantos «deseen». Incluso los núcleos inestables, que se forman como una fase intermedia, pueden estabilizarse de nuevo. Este «proceso r» (r: «rapid», rápido) transcurre con escalas temporales de 0,01 ... 10 seg, con densidades de neutrones de 10^{24} por cm^3, que se dan en la envoltura de una supernova.
8. El «proceso x» es responsable de la síntesis del deuterio, el litio, el berilio y el boro. Tal como sabemos por el Sol, estos elementos se destruyen en el interior de las estrellas por su elevado índice de captura de neutrones. Su formación requiere un entorno de baja densidad y temperatura, y se produce por la fisión de núcleos de carbono, nitrógeno, oxígeno o hierro, iniciada por partículas con mucha energía.

Estos *ocho procesos* hacen posible la constitución de todos los elementos. Los tres primeros tienen lugar en todas las estrellas. En el caso del proceso s existen tres argumentos: *a)* La distribución de frecuencias de los elementos presenta un máximo en los núcleos con capas cerradas (peso atómico 90, 120, 140 y 208), que pueden haberse formado fácilmente en el proceso s. *b)* El tecnecio, elemento que sólo se forma en el proceso s. no tiene ningún isótopo estable. El máximo período de semidesintegración de uno de sus isótopos es de varios millones de años, por lo que tiene que ser producido de nuevo continuamente. *c)* Hay una serie de isótopos relativamente frecuentes que sólo se pueden formar en el proceso s. Por ello se piensa que este proceso transcurre en las estrellas gigantes. Los neutrones necesarios se forman en determinadas reacciones limitadas por el hecho de que como producto final no debe surgir nitrógeno, menos frecuente.

Las supernovas se encuentran al final de la vida de una estrella de mucha masa y vienen definidas por el estado de esa estrella en el momento de su destrucción, cuando desaparece la capa exterior y el núcleo se convierte en una estrella de neutrones. Se trata de una violenta explosión en la que se liberan más de 10^{50} julios (1 kilovatio-hora equivale a 3,6 millones de julios, por lo que la energía de una supernova equivale a $2{,}8\times10^{43}$ kWh; con 1 kWh se podrían calentar 8,5 l de agua de 0º a 100°C).

En los últimos años se han identificado en muchos casos las ondas de choque provocadas por estas explosiones. Algunas de estas ondas se encuentran muy cerca de grupos de estrellas jóvenes. La astrofísica ha identificado también zonas en las que el medio interestelar ha sido comprimido y calentado.

No se conoce muy bien todavía el mecanismo en virtud del cual se forma una supernova. Se supone que, una vez que el hidrógeno ha pasado por «combustión» a helio, las estrellas con mucha masa se colapsan, con lo que se produce calor hasta que la temperatura es suficiente para que el helio pase por «combustión» a carbono. Cuando esto ha ocurrido, la estrella puede seguir colapsándose. La temperatura sigue aumentando hasta que los núcleos de carbono se han sintetizado en núcleos

pesados. Éste es el momento en que surge una supernova como consecuencia de la combustión explosiva del carbono.

En nuestra galaxia podemos partir de la base de que se observa una supernova cada 50 años. Así pues, no es un fenómeno poco frecuente, aparte de que los efectos sobre el medio interestelar del entorno son muy notables. Conviene tener bien presente que se pueden observar los restos de estas explosiones durante más de 100.000 años. Al principio se lanza el material con velocidades en tomo a 10.000 km/seg. En una de las supernovas más antiguas que se conocen se ha apreciado que la capa exterior en expansión ha alcanzado ya un diámetro de 200 años luz y que sigue expandiéndose con una velocidad de 50 km/s.

Esto nos lleva a pensar que la onda de choque provocada por una supernova es responsable del comienzo de la condensación de la nube de gas presolar. En principio este proceso se puede comparar con un cristal a bajo cero en el que se encuentra agua fría; ésta se hiela cuando se golpea el cristal, con lo que una especie de «onda de choque» penetra en el líquido. Otro aspecto que apunta hacia este mecanismo es el hecho de que la mayoría de las estrellas parecen haberse formado en grupos; en las nubes de polvo interestelar existen intensas fuentes de infrarrojo —lo que hace referencia de nuevo a una región calentándose—, con la consiguiente formación de estrellas.

Volviendo de un objeto lejano desde el punto de vista astrofísico a nuestro Sistema Solar nos encontramos en una situación bastante incómoda: aquí no se puede interpretar un hecho determinado con hipótesis plausibles en el marco de un modelo sostenible desde el punto de vista físico, sino que hay que recoger una serie de observaciones en un modelo de este tipo. Para ello es necesario presentar una prueba cuantitativa de que esta idea no se halla en contradicción con la experiencia, y ésta es, en realidad, una tarea absurda. Por lo tanto, vamos a seguir el curso de los acontecimientos sin entrar en pequeños detalles, y vamos a imaginar que tenemos una nube de gas presolar, cuyas dimensiones son plausibles desde el punto de vista astronómico: $2{,}10^{18}$ cm de diámetro, 1.000 átomos por cm^3 de densidad. Calculamos la masa de esta nube de gas en $2{,}10^{33}$ g, suponiendo que tiene un 90% de hidrógeno y un 10% de helio:

los períodos de rotación son más cortos que en la Vía Láctea (200 millones de años). Si se comprimiera esta nube de gas, el «Sol» tendría que alcanzar en el ecuador velocidades de rotación de 2.400 km/seg. Pero se sabe que un sistema mecánico es inestable con velocidades de 400 km/s (el Sol tiene hoy una velocidad de tan sólo 2 km/seg). El astrónomo Fred Hoyle ha sacado de todo ello la conclusión de que la nebulosa solar se hizo inestable con un radio de $2,5 \times 10^{12}$ cm (2/5 del radio de la órbita de Mercurio).

El impulso de giro de la bola de gas sólo se encuentra parcialmente en el Sol. La mayor parte se concentra en los planetas, especialmente los exteriores, una porción está en el gas y en el polvo y el resto ha debido ser expulsado junto con polvo, gas y plasma durante la constitución del sistema planetario. Se supone que esto es así porque los planetas sólo se podrían haber formado de un material bastante más denso del que se obtiene cuando se imagina al material existente en la actualidad y distribuido en la eclíptica. Debía haber entre diez y cien veces más material y no se sabe a dónde ha ido a parar la enorme cantidad sobrante. No puede haber «caído» hacia el Sol, ya que tendría que haber girado con la velocidad angular de los planetas; si hubiera llegado a aquél, nuestra estrella habría visto aumentada cinco mil veces su velocidad angular. Por consiguiente, el material tiene que haber sido lanzado al exterior.

La pérdida de impulso de giro desde el interior hacia el exterior del Sistema Solar parece explicarse, según H. Alfvén, por diversos procesos: existencia de un campo magnético, ionización del gas por la creciente luminosidad de la condensación central (3.500°K con $2,3 \times 10^{12}$ cm de radio, como se ha comprobado con ocasión del estudio de estrellas gigantes), que tiene que haber sido unas 150 veces inferior a la luminosidad actual del Sol, y presencia de corrientes paralelas a las líneas de campo (magnéticas), en virtud de las cuales se pudo transmitir el impulso de giro a las partes exteriores del Sistema Solar. (Hay que imaginar una configuración similar a la representada en la fig. 13-4 para Júpiter.) La posterior contracción desde el radio de $2,3 \times 10^{12}$ cm hasta la dimensión actual del Sol duró varios miles de años. Así pues, la pérdida de impulso de

giro debió tener lugar en este momento, por lo que el campo magnético alcanzaría en la nebulosa una intensidad superior a 10 militeslas.

A medida que continúa la contracción disminuye la luminosidad de la estrella. En esta fase el Sol había comenzado la vida «normal» de una estrella y se había situado en la secuencia principal en el denominado «diagrama de Hertzsprung-Russell».

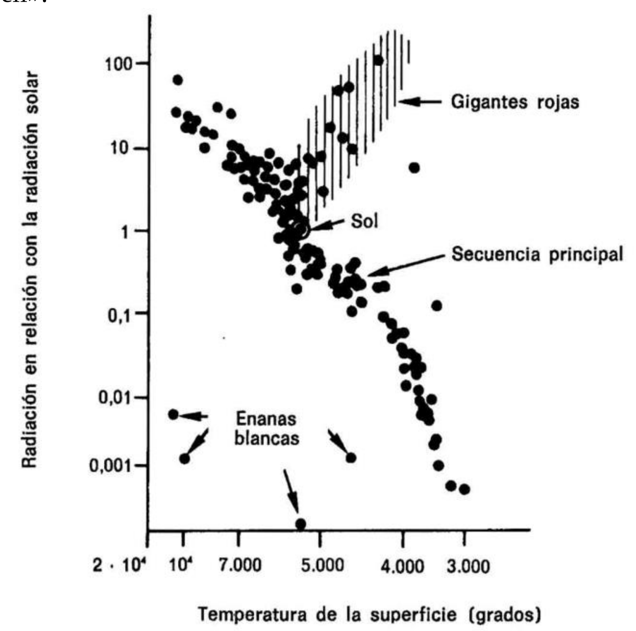


Fig. 9-3. Diagrama Hertzsprung-Russell (DHR) de las estrellas de los alrededores del Sol.

Dos físicos, el danés Ejnar Hertzsprung y el norteamericano Henry Norris Russel, clasificaron los espectros de las estrellas en un diagrama, representando en el eje vertical la luminosidad absoluta y en el horizontal la temperatura de la superficie (fig. 9-3). Este diagrama recibe en la actualidad el nombre de Hertzsprung-Russell (DHR). Sorprendentemente, en un diagrama de este tipo las estrellas de un grupo se ordenan en ramas y no

están distribuidas de un modo arbitrario. En seguida se pensó que toda estrella tiene una historia y sigue una evolución cuyo transcurso depende de su masa.

Por lo que parece, el DHR representa el «status» de la Vía Láctea en la actualidad. Una estrella, por decirlo de un modo sencillo, permanece en un punto de la serie principal de acuerdo con su masa. Al final de la combustión del hidrógeno se inicia la del helio; entonces la estrella comienza a separarse lentamente de la serie principal y «se mueve» hacia la rama de las gigantes. Con el inicio del proceso a alcanza el estado de gigante roja, en el que también tiene lugar el proceso s.

Llegados a este punto conviene recordar lo que conocemos sobre el Sistema Solar. Para poder describir su origen debemos tomar en consideración las características del material del que tenemos motivos para pensar que se trata de material original, invariado, condensado a partir de la nube de gas presolar. Sabemos con seguridad que es un material condrítico que podemos encontrar, por ejemplo, en los meteoritos; las dataciones realizadas (v. apéndice 7) han dado como resultado una edad de 4.600 millones de años. La composición química de este material es unitaria y corresponde a la representada en la figura 9-2.

Por lo que respecta a la composición de isótopos, permite sacar nuevas consecuencias. Hasta hace pocos años los estudios de la composición de isótopos hacían posible la formulación de dos importantes conclusiones: 1. El Sistema Solar es homogéneo en lo que a la composición de isótopos se refiere. 2. Utilizando diversos núcleos radiactivos se pueden determinar procesos temporales. Empleando nucleídos de larga vida con períodos de semidesintegración de más de mil millones de años se obtiene el resultado de que en la Vía Láctea existían, más de 7.000 millones de años antes del origen del Sistema Solar, estrellas que producían elementos pesados. Llama la atención la homogeneidad de la composición de isótopos de diferentes elementos en muy diversas pruebas (Tierra, Luna, meteoritos). Así, por ejemplo, sea cual sea el lugar donde se realice la medición, el bario 135 guarda una proporción de menos del 0,01% con respecto al bario 136 (la exactitud de las

mediciones es, hoy en día, muy elevada). Pero el bario 135 se forma en un proceso r y el 136 en un proceso s. Así pues, lo más probable es que ambos se hayan originado en lugares muy diferentes. Por consiguiente, estos elementos han tenido que ser muy bien mezclados. En el caso del neón y el xenón se han detectado ciertas desviaciones, pese a lo cual no se les ha concedido gran importancia debido a su escasa frecuencia.

A partir de 1973 se han multiplicado los descubrimientos, que han llevado, finalmente, a una revisión de los conceptos. Primero se detectaron anomalías isotópicas en el oxígeno, uno de los elementos más frecuentes. Así, se descubrió que el oxígeno no está distribuido de un modo homogéneo en el Sistema Solar. También se apreciaron anomalías en el magnesio que señalaban al (entre tanto desintegrado) isótopo 26 del aluminio (período de semidesintegración de 730.000 años). Su existencia significa que tuvo que haber una nucleosíntesis en un espacio de tiempo de 3 millones de años durante la fase de formación del Sistema Solar. El descubrimiento del isótopo de la plata con masa 107, producto de la desintegración del paladio, apunta en la misma dirección. Por último, se verificó la presencia de una clase de cuerpos en los que aparecían anomalías en casi todos los constituyentes. Todos estos nuevos conocimientos fueron posibles gracias al meteorito «Allende».

Este condrito con contenido en carbono, de 2 toneladas de peso, cayó el 8 de febrero de 1969 en las proximidades de Chihuahua, en Pueblito de Allende, México. Su hallazgo tuvo lugar en un momento muy oportuno: en aquellos días se preparaban los alunizajes de la misión Apolo. Muchos laboratorios se habían equipado en todo el mundo con los aparatos más modernos para realizar análisis petrográficos (en la actualidad trabajan en tales análisis 150 laboratorios). Pocos días después del impacto del meteorito ya habían llegado los científicos, que consiguieron rescatar varios cientos de kilos de material, impidiendo con ello que se realizara un tratamiento inadecuado o se ejerciera una influencia química. Cuando se analizó el material comenzaron las sorpresas. Se cortaron discos de los fragmentos más grandes, lo que permitió ver por primera vez grandes su-

perficies condríticas, que resultaron ser una mezcla heterogénea de inclusiones de todo tipo, lo que es característico de todos los condritos, desde óxidos hasta silicatos.

Se encontraron indicios de que el meteorito se tenía que haber formado en un campo magnético de unos 80 amperios/m. Pero algunos cóndrulos (v. cap. 7) tienen que haberse constituido en un campo magnético diez veces más intenso. Dado que durante el calentamiento se pierde información magnética, el meteorito no ha podido ser calentado después con más fuerza.

La existencia de oligoelementos en la composición de las inclusiones grandes lleva a la conclusión de que el meteorito se ha formado en el curso de un proceso de fraccionamiento de una fase de gas, lo que ha durado unos 8 millones de años. En 1973^8. N. Clayton y sus colaboradores descubrieron en todas las inclusiones del meteorito Allende anomalías en la proporción de los isótopos del oxígeno con masa 17 y 18: Allende tiene un componente muy rico en ^{16}O que no es «normal», esto es, que posiblemente tenga otro origen. Además, se ha encontrado en Allende material de más de 5.000 millones de años de edad. Por consiguiente, el meteorito ha tenido que formarse fuera del Sistema Solar.

De todo ello podemos sacar la importante conclusión de que durante la formación del Sistema Solar tuvo lugar en las proximidades de la nube protosolar un proceso de nucleosíntesis (p. ej., la explosión de una supernova). Como es natural. Allende no es el único ejemplo Cuando se supo lo que había que buscar se encontraron otros muchos. Este proceso hipotético tiene que haber formado sobre todo elementos ligeros ($A < 30$). Si esto fuera así realmente, tendríamos dos tipos de material en el Sistema Solar: el existente originariamente, que procedía de numerosas explosiones de estrellas y estaba muy mezclado, y un segundo componente que no se pudo mezclar con el material presente con anterioridad.

Por otro lado, a partir del plutonio 244 (período de semidesintegración de 80 millones de años) y del yodo 129 (período de semidesintegración de 16 millones de años), de resultas de la medición del producto de desintegración xenón se deduce

que el proceso de condensación pudo comenzar 100 millones de años después de la aparición de la fuente que añadió material al Sistema Solar antes del comienzo de la condensación. La existencia de aluminio 26, de corta vida, conduce a un período de tiempo no superior a 3 millones de años. Esta contradicción sólo se puede resolver si se acepta que se produjeron dos acontecimientos independientes entre sí. Tal circunstancia índica que durante la formación de los planetas existieron materiales diferentes. Así pues, es posible que el Sol y los planetas tengan una composición distinta. A pesar de que no se ha dado una respuesta definitiva a esta cuestión, en la actualidad se puede aceptar como modelo del origen del Sistema Solar la hipótesis de que la onda de choque de una supernova inició la condensación, explotando una segunda supernova en el sistema de condensación.

La presión de radiación de las estrellas de alrededor pudo determinar una condensación de la nebulosa presolar, que en un principio se hizo elíptica, pero que luego, bajo la influencia de una creciente velocidad de rotación, adquirió forma de disco y en algún momento alcanzó una densidad que hizo posible el colapso gravitacional. Estos procesos se han simulado ya en el ordenador y se ha descubierto que se obtiene un sistema de estrellas dobles cuando no se elimina e impulso, pero que a partir de un disco surge una estrella central si se permite que el impulso de giro se retire hacia el exterior a través, por ejemplo, del proceso electrodinámico de Alfvén. A medida que avanza la condensación el material se calienta, emite radiación y se ioniza. Por tanto, en la última parte del colapso tuvo que influir de un modo decisivo el plasma. La condensación, y por tanto el calentamiento, se aceleraron cada vez más en la nube de gas, al igual que la piedra que rueda por una montaña hacia el valle adquiere una velocidad cada vez mayor hasta que llega al valle y se detiene.

Así pues, la condensación de nuestra nube de gas continúa —en adelante hablaremos de «colapso gravitacional»—. La temperatura aumenta en el interior de la nube de gas y alcanza valores próximos a los 100.000 grados, con lo que cada vez es mayor el número de átomos que pierden de pronto electrones

de su capa exterior —decimos que el gas está ionizado—, y las fuerzas eléctricas comienzan a oponerse a las gravitatorias. Pero las primeras todavía no son lo suficientemente intensas y predomina la fuerza de gravitación. La temperatura sigue ascendiendo y cuando en el interior ha alcanzado valores en tomo a 15 millones de grados, comienzan las reacciones nucleares, pues, con esta temperatura, los núcleos de hidrógeno que están chocando entre sí se unen en núcleos de deuterio y, al final de una cadena de reacciones, forman núcleos de helio. En estos procesos se libera una gran cantidad de energía: la temperatura puede seguir aumentando y la presión del gas también; la fuerza de gravitación queda superada. Se produce un equilibrio entre la fuerza de gravitación dirigida hacia dentro, la fuerza neta de la presión del gas dirigida hacia fuera, la fuerza centrífuga y la presión de radiación. Cada fotón tiene una determinada energía, y con ello una masa equivalente. Comparándolo con las partículas, participará como un átomo ejerciendo una presión, con una componente dirigida hacia fuera (v. apéndice 2).

En estas circunstancias existe un equilibrio entre las fuerzas centrífugas y centrípetas, con lo que cesa la contracción y, en la medida en que es constante la producción de energía en el interior de la estrella, se forma un astro de dimensiones constantes. Sabemos por diferentes fuentes —por ejemplo, estudios sobre las rocas lunares— que la radiación solar no ha variado en una parte importante de la vida del Sol. Por tanto, tenemos motivos para suponer que nuestra estrella no ha cambiado tampoco desde que se inició la «combustión nuclear» (como se dice en ocasiones haciendo referencia a las reacciones nucleares).

Aunque está claro que los planetas se formaron cuando ya existía el Sol, en la actualidad no se ha llegado todavía a un acuerdo sobre los mecanismos implicados en este proceso.

El modelo de la condensación permite entender por qué el Sistema Solar muestra una «simetría de disco». También parece evidente por qué las órbitas de todos los planetas están en el mismo plano y por qué los planetas se mueven en la misma dirección. Plutón es una excepción, pero podría tratarse de una

luna de Neptuno «descarriada» o de un asteroide que se ha salido de su órbita. Primero se debieron formar Júpiter y Saturno a partir de helio e hidrógeno; luego surgirían Urano, Neptuno y los cometas. Estos últimos nacieron en unas condiciones extremas, a tan sólo 100ºK. lejos del calor del Sol. Se supone que están compuestos de hielo de agua, hielo de metano y hielo de amoniaco y de partículas de polvo entremezcladas

En las proximidades del Sol, a temperaturas mucho más elevadas, los elementos ligeros se vaporizaron de los núcleos de condensación y fueron expulsados hacia el exterior por la presión solar de radiación. Sólo quedaron varios elementos pesados, lo que explicaría la diferente composición de Mercurio. Venus, la Tierra y Marte. Esta significativa diferencia se refleja en las densidades medias de los planetas (v. fig. 3-9), que son más o menos iguales en Mercurio. Venus y la Tierra. La densidad de Marte es algo menor, pero se aprecia claramente el salto a los planetas exteriores, que muestran valores muy similares.

Si realizáramos una toma acelerada de, por ejemplo, la formación de la Tierra, tendríamos la siguiente película: una vez que el protosol se hubo contraído hasta tener el diámetro actual, se formaron núcleos de materia en las órbitas de los planetas actuales. En una de las órbitas, uno de ellos creció de pronto por encima de los demás. Debido a su fuerza de gravitación llegaron hasta él fragmentos rocosos de todos los tamaños a velocidades bastante considerables. Esto determinó un fuerte calentamiento de la superficie, y la Tierra se convirtió en seguida en un cuerpo de rocas fundidas. Al mismo tiempo, del interior de nuestro planeta escaparon, a través de violentas erupciones volcánicas, gases que formaron la primera atmósfera del planeta.

Nuestra atmósfera actual es muy diferente de aquella. La vida influye mucho sobre su composición. Las atmósferas de Marte y Venus, planetas «muertos», son más parecidas a la atmósfera primitiva de la Tierra. Las huellas de los primeros sucesos acontecidos en nuestro planeta han sido eliminadas en gran medida de la superficie: el viento y las precipitaciones borraron hace tiempo las cicatrices dejadas por los impactos y la

formación de montañas (tectónica) ha dado un nuevo aspecto a la Tierra.

Es probable que una parte de la energía necesaria para la fusión de la superficie terrestre recién solidificada se liberara por desintegración radiactiva en el interior del planeta, al igual que la contracción de la Tierra debida a la gravitación liberó calor. Durante la fusión descendió material pesado hacia el interior, con lo que el material ligero quedó en la superficie; de este modo se formaron el núcleo, el manto y la corteza. Durante el enfriamiento se condensó el agua y rellenó las fosas y las depresiones existentes entre los continentes. En algún momento, no mucho después de la solidificación de la superficie, se formaron moléculas orgánicas que —quizá por casualidad— de pronto tuvieron la capacidad de reproducirse. Así, o de un modo parecido, es como nos imaginamos que se formó todo nuestro entorno... y nosotros mismos.

Todos los cuerpos del Sistema Solar han seguido, en principio, una misma evolución: tras la condensación, que tuvo lugar a temperaturas bastante bajas, la energía gravitacional liberada y la radiactividad del interior de estos cuernos determinaron un calentamiento. Esto modificó en gran medida las estructuras originales, y especialmente las características químicas. En el caso de los planetas terrestres se formaron núcleos ricos en hierro, recubiertos por cortezas de silicatos y mantos de silicatos ferromagnésicos. Estos procesos han cesado en los planetas más pequeños, en algunas lunas y en los asteroides, pero se desarrollan todavía en la Tierra y probablemente también en Venus y Marte. Han formado las estructuras de la superficie de los planetas, pero también su estructura interna. La fusión y la posterior solidificación determinaron una cristalización fraccionada (se dice que el material está «diferenciado») y, al mismo tiempo, desplazamientos verticales. El volcanismo y la tectónica tienen su origen en estos procesos: surgen tensiones y se equilibran a través de los seísmos, los volcanes entran en erupción, las cavidades interiores se desploman. La deriva de los continentes es otra consecuencia de estos procesos.

Así pues, la forma de la superficie de los planetas es el resultado de la actuación de fuerzas procedentes de su interior (p.

ej., formación de montañas, volcanismo), de la acción de los agentes atmosféricos (erosión) y de los impactos de los meteoritos. Resulta interesante analizar la frecuencia de estos impactos. Las sondas espaciales nos han proporcionado en los últimos años fascinantes imágenes de la Luna y de los planetas interiores. Estas fotografías nos han permitido conocer la variación de las frecuencias de los cráteres meteóricos. Desde el origen del Sistema Solar, el número de cráteres ha descendido en todos los planetas de forma exponencial.

Nuestro conocimiento de todas estas relaciones ha estado dificultado durante muchos años por el hecho de que en la Tierra no existen indicios reveladores de los fenómenos acaecidos durante los primeros cientos de millones de años del Sistema Solar. En nuestro planeta apenas se encuentran rocas que tengan más de 2.800 millones de años. Los minerales más antiguos que se han hallado (al oeste de Groenlandia) tienen unos 3.800 millones de años. ¿Por qué no hay en la Tierra rocas más antiguas? Hasta la llegada del hombre a la Luna no se pudo dar una respuesta a esta pregunta. En las zonas oscuras de mare se encuentran abundantes rocas lunares que tienen entre 3.300 y 3.800 millones de años. En las regiones claras, más elevadas, se hallan presentes rocas más antiguas, de entre 3.900 y 4.000 millones de años; la roca de mayor edad que se conoce tiene 4.200 millones de años. Los datos sobre la edad son datos «radiógenos» y expresan el tiempo que ha transcurrido desde el último depósito o calentamiento de rocas y minerales. Si tras la primera condensación del material se hubiera producido un posterior calentamiento con licuefacción, el «reloj radiactivo» habría partido de nuevo de cero. Así pues, las rocas más antiguas indican el momento de la última solidificación del material. Ello nos hace suponer que en los primeros 200-300 millones de años tras su formación la Luna estuvo relativamente «blanda» antes de solidificarse. La Tierra no presenta ningún indicio de sus primeros 800 millones de años: hasta entonces fue tan sólo una bola de fuego.

En cambio, el material condrítico no ha podido ser «calentado» tras su formación: no se encuentra yodo radiactivo (yodo 129), que se desintegra con un período de semidesintegración

de 16,4 millones de años en xenón 129, un gas noble. A partir de la cantidad de xenón se puede calcular la cantidad de yodo que existía anteriormente, lo que permite saber el tiempo que transcurrió hasta que el cuerpo analizado se aisló de su entorno al solidificarse: 100 millones de años.

Así pues, los condritos constituyen un material terrestre «antiguo» porque se solidificaron muy pronto. El material condrítico se encuentra con mucha frecuencia en los meteoritos. Su contenido en gas, bastante inferior al descubierto en las rocas lunares, es una consecuencia del bombardeo de rocas con núcleos de hidrógeno y helio característico del viento solar. Por consiguiente, los meteoritos se han mantenido desde su solidificación en distancias de pocas unidades astronómicas; esto se representa también en la figura 7-3 y hace suponer que proceden fundamentalmente del cinturón de asteroides (2,6 UA).

El resto de los planetas interiores se formó, en principio, de la misma manera que la Tierra. Como ya hemos mencionado, es muy probable que primero se constituyeran «núcleos»: fragmentos de roca de algunos centímetros que llegaron al plano de simetría del sistema, la eclíptica, y chocaron allí entre sí, con lo que algunos se destruyeron y otros se unieron formando un cuerpo de mayor tamaño. Luego todo sucedió como en el famoso juego del «monopoly»: los cuerpos grandes crecieron cada vez más deprisa. En la figura 9-4 se comparan los tamaños de los planetas interiores y Júpiter.

La composición de isótopos de las rocas lunares más antiguas (halladas en las zonas de terra) indica también que estas rocas llegaron de fuera durante un bombardeo intenso, que dio forma a las zonas altas de la Luna, cubiertas de cráteres. La lluvia de rocas cesó de pronto hace 3.900 millones de años. Las zonas de mare son más recientes, por lo que en ellas se encuentran menos huellas de tales impactos.

La Tierra también sufrió este bombardeo. Recordemos la roca más antigua: cuando se solidificó la corteza terrestre había pocos meteoritos, por lo que nuestro planeta apenas tiene cráteres. Mercurio y Marte se parecen a la Luna. Por ello es probablemente acertado suponer que todos los planetas terrestres sufrieron esta lluvia de piedras, pero que la Tierra se solidificó

más tarde que los demás. Marte y Venus tenían volcanes como la Tierra y en consecuencia su estructura interna debe ser similar. Tras la solidificación comenzó la salida de gases y de este modo se formaron las atmósferas de los tres planetas.

La formación de la Luna todavía no ha sido explicada por completo. La densidad media de nuestro satélite es similar a la del manto superior de la Tierra (v. tablas 8-1 y 3-2). Sólo por esto —y también por otros motivos— resulta hoy insostenible la hipótesis de que la Luna ha sido «capturada» en un momento dado, esto es, que se formó en algún otro lugar (si se hubiera formado independientemente de la órbita terrestre tendría que ser más rica en hierro).

Debido a la semejanza de su densidad con la del manto terrestre, muchos científicos apoyan hoy la hipótesis de que la Luna se separó de algún modo de la Tierra. Esta explicación se basa en muy diversos hechos. El impulso de giro específico del sistema Tierra-Luna, por ejemplo, se encuentra próximo a una curva que parece ser el límite superior de este impulso de giro (referido a la unidad de masa) de los cuerpos sólidos. El efecto de marea ha transmitido sin duda energía de rotación de la Tierra a la Luna. El impulso de giro de la Tierra y la Luna mantiene una proporción de 2:1. Hace 4.500 millones de años la Tierra y su satélite estaban más «cerca» que hoy. De hecho, la frecuencia de los elementos en las rocas lunares, y sobre todo la de elementos poco volátiles, es muy parecida a la que se registra en la corteza terrestre (así. p. ej., en lo que al contenido de hierro se refiere, aproximadamente un 7%). Los isótopos del oxígeno muestran casi la misma proporción en ambos materiales. Tras la separación de los dos sistemas (no existe un acuerdo sobre cuál fue el mecanismo correspondiente) cada cuerpo tuvo una evolución térmica diferente.

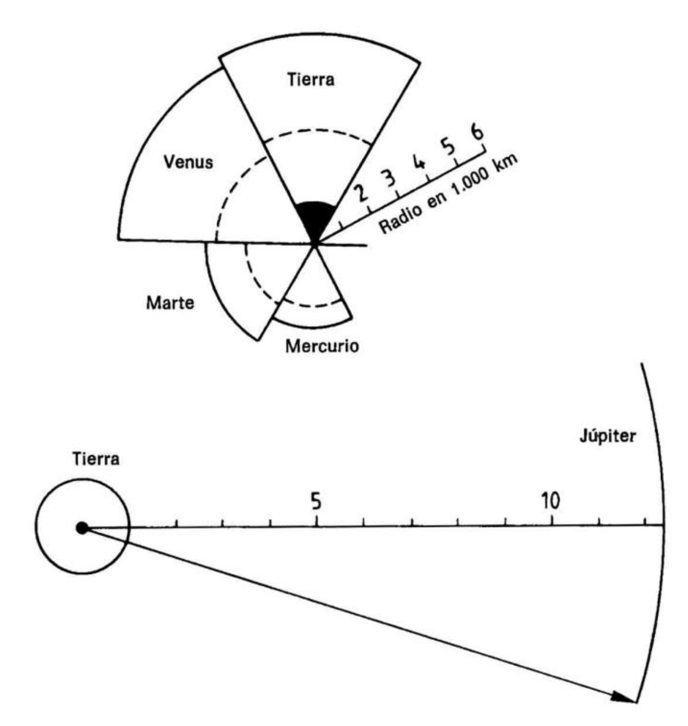


Fig. 9-4. Comparación del tamaño de los planetas y sus estructuras internas. En la parte inferior se comparan la Tierra y Júpiter.

Existe la evidencia de que se han producido intensos calentamientos en el Sistema Solar. Los meteoritos de hierro estaban «derretidos» y se han ido enfriando lentamente. En todos los planetas hay indicios de que las superficies se hallaban en estado fluido. El calor puede proceder de la energía gravitacional liberada en la contracción, o bien ser consecuencia del calentamiento radiactivo. También es posible que en el origen del calor estén corrientes inducidas por el campo magnético solar en los planetas en rotación. En el caso del calentamiento de la Luna se descarta prácticamente la energía gravitacional.

No hace mucho tiempo que tenemos información sobre la edad de la Tierra. Antes del descubrimiento de la radiactividad

por Antoine Becquerel (1896) se calculaba que nuestro planeta tenía algunos miles de años, basando por lo general los cálculos, en argumentos bíblicos, el arzobispo Usher, por su parte, situó la creación en el año 4004 a.C. Los geólogos comenzaron a realizar dataciones relativas (tabla 9-1) cuando descubrieron que ciertos fósiles aparecían sólo en determinadas formaciones geológicas. Las dataciones con métodos radiactivos se iniciaron en 1907.

Tabla 9-1. Formaciones geológicas

Era	Periodo	Formación	Duración (millones de años)	Comienzo (hace millones de años)	Fósiles principales
Neozoico	Cuaternario	Aluvial		0,01	
		Diluvial	2,5	2,5	Ser humano
	Terciario	Plioceno	4,5	7	
		Mioceno	19	26	
		Oligoceno	12	38	
		Eoceno	16	54	
		Paleoceno	11	65	
Mesozoico	Cretácico	Cretácico inferior y superior	71	136	Plantas con flores
		Malm Dogger Lías	54	190	Aves
	Triásico	Keuper		225	Mamíferos
		Muschelkalk	36		Dinosaurios
		Buntsandstein			
Paleozoico	Pérmico	Zechstein Rotliegendes	55	280	Moluscos, cefalópodos, insectos. peces, anfibios
	Carbonífero	Carbonífero superior Carbonífero inferior	65	345	Reptiles, anfibios. licopodios, gimnospermas
	Devónico	Devónico superior, medio e inferior	45	400	Anfibios, vertebrados terrestres
	Silúrico	Gotlandiense	35	430	Plantas y animales terrestres, conchas de quitina, invertebrados
		Ordovícico	70	500	Invertebrados, graftolitos
	Cámbrico	Cámbrico superior, medio e inferior	70	570	Vertebrados (peces), crustáceos, algas*
Precámbrico	Algónquico Arcaico	Precámbrico (superior)	1.500		Pocas algas azules
	Formación de la corteza terrestre	Precámbrio (inferior)	2.500		Estromatolitos
			4.600		

* Protozoos y acalefos (se conocen más de 3.000 especies). El 50% de las especies son trilobites.

El primer indicio de vida en la Tierra se ha encontrado en Australia, en una roca que se calcula tiene 3.400 millones de años. Así pues, se puede partir de la base de que la vida surgió casi inmediatamente después de la formación de la corteza terrestre. La atmósfera de la Tierra tenía entonces una composición diferente: hidrógeno, metano, vapor de agua, amoniaco y anhídrido carbónico. Había asimismo aerosol, esto es, un polvo fino cuyo movimiento relativo en la atmósfera determinaba procesos de carga y tenía como consecuencia descargas eléctricas. Se sabe que también existen rayos en las atmósferas de Venus y Júpiter. En estas condiciones se pueden formar aminoácidos, tal como se ha demostrado en el laboratorio. Desde el punto de vista químico esta atmósfera era reductora, no oxidante. El oxígeno llegó a ella como consecuencia de la evolución de la vida, que hace 3.000 millones de años debió tener un desarrollo tan intenso que todavía hoy podemos obtener pruebas de ello. Los sistemas vivos se desarrollaron a partir de estas primeras formas en una especie de evolución química cuyo resultado fueron las moléculas capaces de dividirse. El oxígeno se formó deprisa. En cualquier caso, existen pruebas de que en los últimos 350 millones de años el contenido de oxígeno de la atmósfera no ha descendido nunca por debajo del 6%.

Tres materiales forman la estructura del Sistema Solar: gas, hielo y roca. El hidrógeno y los gases nobles prácticamente no se condensan; el carbono, el oxígeno y el nitrógeno son los principales elementos que dan lugar a la formación de hielo (agua, metano y amoniaco). El resto de los elementos más frecuentes (silicio, magnesio, hierro) forman las rocas. La principal diferencia entre los planetas exteriores y los terrestres radica en que los de mayor tamaño, esto es, los exteriores, contienen al menos una gran parte de los gases volátiles que los planetas interiores han perdido.

La presión en el interior de un planeta está determinada por la relación entre masa y radio. Si la presión no es muy alta, la materia se comporta como si estuviera sometida a presiones «normales», y el radio es proporcional a la raíz cúbica de la masa. Pero cuando la presión es tan alta que los átomos degeneran, cambian las condiciones. La masa y el radio de Júpiter

y Saturno sólo se pueden explicar si ambos planetas están compuestos fundamentalmente de hidrógeno. El caso de Urano y Neptuno no se puede concebir tan fácilmente.

La masa de Júpiter y Saturno es tan grande que durante su formación se produjo una especie de colapso gravitacional. En cambio. Urano y Neptuno podrían ser el producto de una condensación más lenta. Probablemente surgieron en el plano ecuatorial discos gaseosos, a partir de los cuales se condensaron las lunas. En la figura 9-5 se recogen los conocimientos actuales sobre la estructura interna de los planetas.

Estas diferencias podrían explicar por qué los grandes planetas tienen tantas lunas, mientras que los planetas interiores carecen de ellas. No hay que olvidar que es probable que la Luna terrestre se formara debido a una situación muy especial, y que las lunas de Marte parecen asteroides (también en relación con su «curva de luz»). La proximidad espacial de Marte y Júpiter, unida a su potencial de gravitación, que ha sacado de su órbita a varios asteroides, hacen que esta hipótesis resulte muy plausible. Venus y Mercurio no poseen ninguna luna, hecho que parece lógico. Urano, en cambio, plantea algunas dificultades: tiene en común con Venus la rotación retrógrada. Pero mientras que Venus ha perdido su «spin» original debido al efecto de marea, Urano no ha tenido en ningún momento un «spin». Antes de que se formaran sus lunas debió colisionar con un cuerpo (se ha calculado que basta que tuviera un 7% de la masa de Urano) que inclinó 90° el eje de rotación. Sólo después pudieron formarse los satélites, que se mueven alrededor de los planetas en el sentido de su rotación, con órbitas que fueron desplazadas hacia el plano ecuatorial por el efecto de marea, y quizá también por fenómenos electrodinámicos. En cambio, la estructura interna de Urano y Neptuno es muy distinta: contiene menos hidrógeno que Júpiter y Saturno, pero tampoco puede estar compuesta de una sola sustancia. Se supone que tiene un núcleo de silicatos envuelto por una capa de hidrógeno y otra de hielo de metano y amoniaco. Esta estructura hace posible una conductividad eléctrica suficientemente alta y, con ello, la existencia de una dinamo y de un campo

magnético planetario. En esta hipótesis se basa también la magnetosfera de Urano, de la que hablaremos en el capítulo XIII.

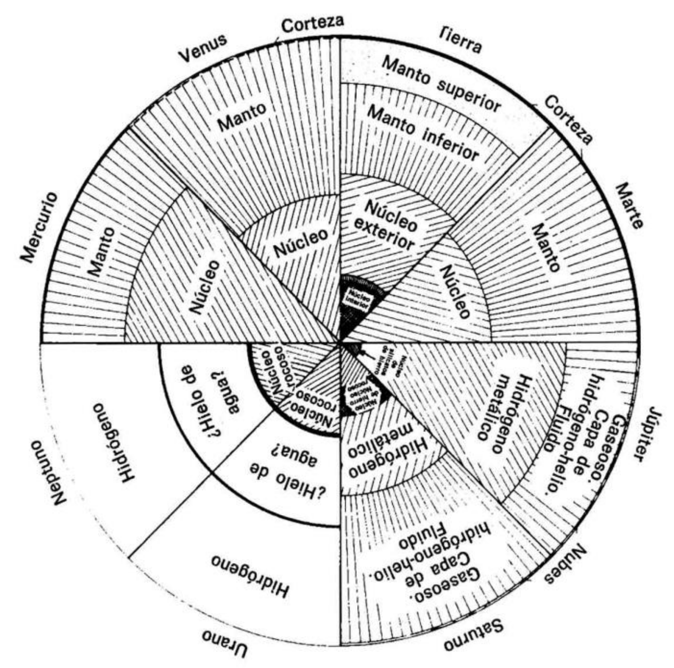


Fig. 9-5. La estructura interna de los planetas. Se han igualado los radios de todos ellos, de modo que se expresa la extensión relativa de las estructuras internas, como núcleo, manto, etc.

Para poner fin a este capítulo vamos a hacer algunas consideraciones sobre el futuro. Pienso que, a partir de lo aquí expuesto está claro que el Sol se convertirá, en un día todavía muy lejano, en una «enana blanca» de algunos kilómetros de diámetro que se enfriará lentamente. Alrededor de esta enana blanca sólo se moverán planetas iluminados por la luz de las estrellas, con una temperatura que se igualará lentamente a la de radiación del entorno (muy pocos grados por encima del

cero absoluto). En tales condiciones no existirá ya vida. El «hogar» de la humanidad no será habitable dentro de unos 10.000 millones de años (como mucho).

A continuación vamos a ocuparnos de nuevo de nuestro entorno, del interior (cap. X) y del exterior de los planetas.

X. CÓMO ES EL INTERIOR DE UN PLANETA Y CÓMO SE CONOCE

Los seísmos se producen como consecuencia de derrumbamientos en el interior de la Tierra o de erupciones volcánicas, pero lo más frecuente es que se deban al equilibrio de las tensiones en la corteza terrestre. Al igual que una piedra lanzada al agua crea ondas en la superficie de ésta, un seísmo provoca también unas ondulaciones en la Tierra que se expanden a partir del foco sísmico. La propagación de estas ondas se puede describir matemáticamente. En esta teoría hay varias magnitudes relacionadas con las características del cuerpo terrestre. Las ondas se propagan con una velocidad determinada y la Tierra se comporta como un medio elástico; a partir de la velocidad de propagación de las ondas es posible conocer la comprensibilidad y la elasticidad del material. Se trata de magnitudes fenomenológicas que describen determinadas características de aquél. La física contempla otras magnitudes fundamentales. Los fenómenos macroscópicos se producen por la actuación conjunta de muchos átomos como sucede, por ejemplo, en la formación de cristales. De este modo, las magnitudes fenomenológicas proporcionan información sobre la densidad del material y sobre su composición química o su estratificación.

Una onda elástica (longitudinal o transversal) se puede propagar en una esfera bien a lo largo de la superficie, bien a través del interior del cuerpo. La onda llegará a un lugar determinado en un tiempo diferente según el camino que haya seguido. La propagación por el interior del cuerpo sufre diversas influencias: las ondas, al igual que ocurre en la luz, pueden romperse o reflejarse al chocar contra una superficie de separación entre dos medios. En este caso no se trata de ondas electromagnéticas, sino de ondas elásticas, que pueden ser de tipo longitudinal (como las ondas sonoras) o transversal (donde el sentido de la oscilación es perpendicular al sentido de la propagación).

Las ondas (longitudinales) se propagan también a través del núcleo de la Tierra. Disponiendo de registros procedentes de todo el mundo se puede reconstruir la propagación de estas ondas en el interior de la Tierra. Al igual que los rayos luminosos, se intensifican en determinadas zonas, mientras que en otras se debilitan (zonas de sombra). Las ondas transversales sólo se pueden propagar en medios sólidos, no en líquidos. Por lo general, las ondas que se propagan a través del núcleo son las primeras en llegar al observador situado a gran distancia del foco. Por eso se les denomina ondas primarias, recibiendo las que llegan con posterioridad el nombre de ondas secundarias. Los «sismógrafos» permiten conocer estas ondas. Se trata de aparatos muy sensibles que registran los movimientos del suelo y están construidos de modo que se puede conocer el movimiento relativo del suelo en relación con su masa. Dado que en las estaciones que, mirando desde el foco, se encuentran «detrás» del núcleo no se registran ondas transversales, se puede pensar que a partir de 5.100 km de profundidad el núcleo de la Tierra es fluido (fig. 4-5).

Para estudiar la corteza terrestre se utiliza, además de los seísmos naturales, explosiones provocadas artificialmente. En el caso de la explotación de yacimientos, por citar un ejemplo, se recurre con mucha frecuencia a este procedimiento (sismología). La intensidad de la explosión desempeña un papel importante cuando se analiza la estructura de las capas más profundas, pues todos los sismógrafos registran cierto «murmullo» debido a los movimientos de su entorno. Por consiguiente, para poder registrar una onda ésta debe tener una intensidad mínima. A ello se debe que en la geofísica desempeñen un papel especial las «explosiones» muy intensas, como la erupción de volcán Krakatoa el 23-26 de agosto de 1883 o el impacto del gigantesco meteorito siberiano el 30 de junio de 1908.

Las bases del método sísmico las sentó Emil Wiechert, quien en el año 1898 ocupó, en Gotinga, la primera cátedra de geofísica creada en una universidad alemana. Los estudios sismológicos nos han permitido conocer las características de la corteza y de las capas más profundas de la Tierra.

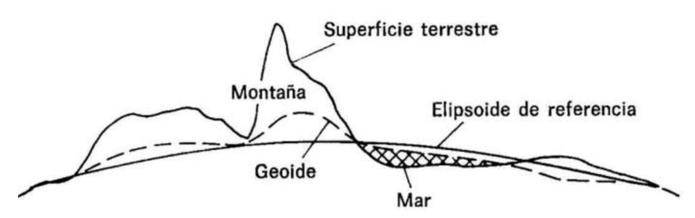


Fig. 10-1. Esquema del relieve de la superficie terrestre. Junto a la estructura real de la superficie se ha representado el elipsoide de referencia geométrico y el geoide determinado por las mediciones de la gravedad, que desempeña un papel importante en la geofísica.

El campo de gravedad terrestre en el espacio exterior constituye otra fuente de información sobre la estructura del interior de nuestro planeta. Informaciones sobre el campo de gravedad se obtienen, por ejemplo, a partir de la observación del movimiento de los satélites lanzados por el hombre: la desviación del movimiento respecto del caso ideal de una esfera de masa homogénea determina notables modificaciones en la distribución de la masa y en la configuración de la Tierra. La superficie no es una figura fácil de describir desde el punto de vista matemático. Por ello se intenta sustituir la forma real (v. fig. 10-1) por una que se aproxime a la realidad, el «geoide»[16] que es una superficie cerrada equipotencial que pasa por el nivel medio de los mares. Las variaciones locales de la gravedad —en las proximidades, por ejemplo, de montañas o yacimientos minerales— sólo tienen un efecto significativo cerca de las masas que provocan la anomalía. A mayor distancia estas desviaciones desaparecen, teniendo efecto tan sólo la distribución global

[16] El geoide está basado en las mediciones de la gravedad. Desde el punto de vista geográfico, por ejemplo, resulta muy útil disponer de esta superficie de referencia. Empíricamente se puede determinar por triangulación un poliedro constituido por muchos elementos superficiales. Con la ayuda de los satélites terrestres resulta posible en la actualidad la unión de las diferentes partes del poliedro terrestre hasta unos pocos metros. Sin embargo, en ocasiones resulta más cómodo utilizar un elipsoide de referencia. Internacionalmente es muy empleado el elipsoide de revolución achatado, cuyos semiejes mayor y menor miden 6.378,2 y 6.356,8 km, respectivamente.

de las masas. Una masa menos pesada en su entorno «flota» en el material que la rodea. Así, la masa rocosa de los Alpes se hunde 50 km en las masas rocosas menos densas de su alrededor.

Para conocer la distribución de las densidades en el interior de la Tierra se parte de la distribución de la presión hidrostática.[17] La densidad media de la Tierra, conocida a partir de mediciones astronómicas, es de 5,52 g/cm^3. También se conoce el momento de inercia en tomo al eje de rotación. Con estos datos se calculan los cambios de densidad a medida que aumenta la profundidad, obteniéndose valores de entre 3,3 y 5,9 g/cm^3 para el manto y entre 9,8 y 12,8 g/cm^3 para el núcleo terrestre. En cuanto a la presión en el interior de la Tierra, este cálculo arroja un valor de 1.400 kbar en el límite entre manto y núcleo y de 3.400 kbar en el centro de nuestro planeta. La temperatura del interior de la Tierra aumenta en la corteza unos 30°C por cada km de profundidad («gradiente geotérmico»), pero es probable que a mayor profundidad su valor ascienda más despacio y alcance en el centro del planeta entre 3.000 y 6.000°C. Esta temperatura se mantiene por la energía gravitacional liberada como consecuencia de la continua contracción del cuerpo terrestre, por la desintegración de sustancias radiactivas, o por ambos motivos a la vez. Pero descenderá. Hoy se admite que el 70% del calor de la Tierra procede de la desintegración radiactiva

Las anomalías del campo de gravedad terrestre proporcionan también nuevas informaciones sobre la estructura de la corteza de nuestro planeta. Los conocimientos adquiridos a través del estudio del campo de gravedad y los procedentes de la investigación de los seísmos nos permiten tener una idea bastante exacta de la estructura interna. A ello se unen, como tercera fuente de información, las mediciones del campo magnético. Nuestro planeta tiene un campo magnético dipolar que presenta ciertas variaciones locales.

---

[17] Es la distribución de la presión en un fluido bajo la influencia única de la gravedad.

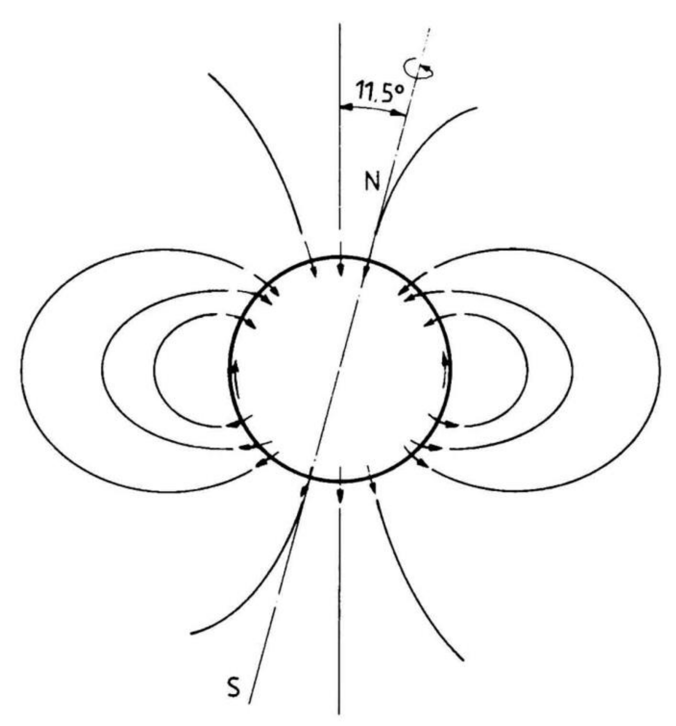


Fig. 10-2. El dipolo magnético de la Tierra está inclinado unos 11,5 grados con respecto al eje de rotación terrestre. El polo magnético del norte es un «polo sur» magnético (se trata de una convención, sin mayor importancia).

En la superficie del planeta y en su entorno más próximo domina la parte dipolar del campo magnético (v. fig. 10-2). El campo tiene en los polos una intensidad de 60 microteslas, con 30 microteslas en el ecuador (el «gauss», unidad antes habitual en geofísica, ha sido sustituido hace poco por el «tesla»: 10.000 gauss equivalen a un tesla). El dipolo magnético muestra una inclinación de 11 grados con respecto al eje de rotación de la Tierra. En la superficie, las rocas que contienen material magnético o magnetizable determinan la existencia de variaciones locales del campo magnético general. Las comentes de las capas conductivas de la atmósfera terrestre también modifican el

campo magnético exterior, repercutiendo al mismo tiempo sobre el interior debido al efecto de inducción. También hay corrientes en las capas conductoras del interior del planeta, así como en la superficie (corrientes telúricas).

Estos cambios locales varían en el tiempo con períodos característicos de aproximadamente 1.000 años. Todos muestran un desplazamiento hacia el oeste de 9,5 km/año. El campo terrestre «se ha dado la vuelta» en períodos típicos de un millón de años, pudiendo durar un milenio una reversión de esta naturaleza. Entre medias el campo ha mostrado aproximadamente la intensidad que tiene hoy, y la Tierra hace ya 3.000 millones de años que mantiene el mismo campo magnético. De momento no se puede demostrar que estas inversiones del campo —durante las cuales fue sin duda más intensa la radiación cósmica incidente sobre el suelo terrestre (en el ecuador alcanzó el valor que tiene hoy en la región polar)— estuvieran acompañadas de variaciones biológicas (ésta es, en cualquier caso, una cuestión muy debatida).

Si prescindiéramos de la atmósfera y del viento solar el campo dipolar de la Tierra sería tal y como se representa en la figura 10-2. Se aprecia que este campo tiene un eje alrededor del cual el campo es simétrico. Curiosamente, en ninguno de los planetas que poseen campo magnético coincide este eje con el de rotación, mostrándose siempre inclinado con respecto a él. El eje dipolar también está desplazado con respecto al centro de la Tierra (dipolo excéntrico) y no se halla fijo, sino que se mueve. Esto se puede apreciar, por ejemplo, midiendo la intensidad y el ángulo de inclinación del campo magnético local en un determinado lugar y en intervalos de tiempo regulares. De este modo se observa lo que los geofísicos denominan variación secular del campo magnético terrestre, un fenómeno regional que en un continente alcanza valores considerables. La variación secular del campo magnético de otros continentes puede ser muy diferente. Así pues, se trata de uno de esos fenómenos no del todo explicados por el momento.

El campo magnético es un instrumento excelente para sondear las profundidades del cuerpo terrestre. La variación secular revela cambios producidos en las capas más profundas del

interior de la Tierra. La existencia de este campo está ligada sin duda a la de un núcleo terrestre fluido. Por consiguiente, sus variaciones pueden relacionarse con cambios producidos en las profundidades de nuestro planeta. Volveremos sobre esta cuestión en el capítulo 11.

Pero también existen oscilaciones de la rotación terrestre que nos pueden aportar datos sobre el interior de nuestro planeta. La dirección del eje terrestre cambia en el espacio como consecuencia de la fuerza de gravitación del Sol y la Luna (v. fig. 2-2). La Tierra (todos los planetas) es como una peonza y la física nos enseña que cuando se ejerce una fuerza sobre una peonza el momento de giro que actúa en el eje de rotación obliga a éste a desplazarse en sentido perpendicular. Así pues, una fuerza que actúa constantemente desde el exterior obliga al eje de la Tierra a moverse en una superficie cónica en tomo a la posición normal. Este movimiento se denomina «precesión». Dado que la Tierra presenta una distribución irregular de las masas, la fuerza de gravitación varía también ligeramente, con lo que el movimiento de precesión no dará como resultado una superficie cónica lisa, sino más bien «rugosa». A partir de este movimiento se puede conocer la proporción del momento de inercia de la Tierra en torno a diversos ejes. Sería posible elaborar un modelo partiendo de la base de un cuerpo terrestre homogéneo, esto es, un cuerpo terrestre cuyo material tuviera la misma densidad en todas partes, estableciendo estratificaciones, etc. De este modo los científicos se hallan en condiciones de hacer afirmaciones globales sobre modelos que son semejantes a la estructura real de la Tierra.

Pero ya que nuestro planeta no es un cuerpo rígido, como se sabe por las observaciones sismológicas, no siempre corresponderá a la imagen ideal de estos modelos. Por tanto, las mediciones geofísicas deben completarse con otras realizadas en el laboratorio, pues en las grandes profundidades la materia está sometida a una fuerte presión con elevadas temperaturas, de modo que la química y la mineralogía se hallan condicionadas por regularidades diferentes a las que conocemos en zonas más próximas a la superficie. En contraposición con la investigación de la atmósfera y la magnetosfera, donde las mediciones

in situ permiten conocer directamente las características físicas, en la actualidad casi carecemos de instrumentos para realizar mediciones en las profundidades del planeta.

El estudio de la Tierra se basa fundamentalmente en las informaciones que proporcionan las mediciones sísmicas, las mediciones del potencial de gravitación y sus anomalías, así como las mediciones magnéticas y geoeléctricas. A ello se unen los estudios de las oscilaciones propias del cuerpo terrestre, de las mareas y de la geotermia. El geofísico compara estas informaciones con teorías físicas sobre la variación de la densidad, la temperatura y la presión en el interior de la Tierra en función de la distancia con respecto de su centro. A partir de ahí es posible elaborar hipótesis y llegar a modelos sobre cuya realidad se pueden hacer afirmaciones al comparar los datos obtenidos en los estudios.

Sabemos que la rotación terrestre sufre un retardamiento secular: el día se alarga 1 milisegundo por siglo. Esta circunstancia se halla determinada fundamentalmente por el efecto de marea. Conocemos, además, variaciones irregulares que pueden manifestarse en retardamientos o adelantos de hasta 30 seg en el tránsito por un meridiano. Se deben a desplazamientos de masa en el cuerpo terrestre; tanto en las capas profundas como en la superficie (p. ej., la fusión del hielo en la Europa central al final de la «edad del hielo» fue un proceso de este tipo). Pero los efectos electrodinámicos también pueden actuar del mismo modo: las tempestades magnéticas fuertes determinan a veces que la duración del día varíe en varios milisegundos. El reajuste del valor normal puede prolongarse durante varios meses. También existen las variaciones periódicas ya mencionadas. Entre ellas se cuentan un retardamiento anual en la primavera y el verano septentrionales y una variación contraria en otoño e invierno, provocada por las mareas, las corrientes marítimas, el viento y el desplazamiento de masas de aire. Por último, tenemos el período de Chandler, cuya causa hay que buscarla en la elasticidad del cuerpo terrestre. Su manifestación más conocida es el movimiento del eje dentro de un círculo de 10 m de radio. Todas las informaciones obtenidas con la ayuda

de los métodos expuestos conducen al modelo de la estructura de la Tierra representado en la figura 4-5.

La Tierra es el único planeta sobre el que disponemos de información tan detallada. Pero desde el programa Apolo se encuentran también sismógrafos en la Luna. Esto nos ha permitido obtener algunos datos acerca del interior de nuestro satélite. Así, a través de mediciones con rayos láser, realizadas con la ayuda de reflectores, se conoce la distancia exacta entre la Tierra y la Luna. Se han detectado anomalías gravitacionales y magnéticas en esta última, y la trasposición de los conocimientos obtenidos en la Tierra —considerando las características lunares— también han hecho posible un conocimiento relativamente detallado de la estructura del satélite. De este modo han ido avanzando poco a poco nuestros conocimientos sobre la estructura de los planetas.

XI. EL MAGNETISMO DE LOS PLANETAS

Antiguamente se pensaba que el «magnetismo continuo de los planetas» —según Christian Morgenstem— era más bien un truco de la naturaleza. Los chinos descubrieron el campo magnético en el primer milenio de nuestra era y el físico inglés William Gilbert percibió su carácter espacial. Por último, Carl Friedrich Gauss descubrió los métodos que permiten medir la intensidad y la dirección del campo magnético, promoviendo además un programa internacional de elaboración de mapas magnéticos de la superficie terrestre. La provechosa característica de nuestro campo magnético en el sentido de desviar una aguja imantada permitió desarrollar un sencillo método para orientarse en la Tierra.

Antes de este siglo no se disponía de información segura sobre los campos magnéticos de otras estrellas o planetas. Naturalmente, el campo magnético que mejor conocemos es el de la Tierra. Muchas de las ideas que los geofísicos han desarrollado sobre el campo magnético terrestre en los últimos cincuenta años se han aplicado con éxito a otros planetas, y también al Sol. Con las sondas espaciales se ha estudiado el campo magnético terrestre y su desarrollo exterior; del mismo modo, también se han adquirido conocimientos sobre los campos magnéticos de la Luna, de los planetas interiores, de Marte, de Júpiter y de Saturno; pronto conoceremos también el de Urano.

Un campo magnético se puede definir como una «magnitud vectorial»: el campo tiene en cada lugar un determinado valor y una determinada dirección. Dos ángulos definen esta dirección: la inclinación es el ángulo del vector del campo magnético con el plano horizontal, en tanto que la declinación-es la diferencia angular, medida en el plano del horizonte, entre el norte geográfico y el norte magnético. Para representar un campo magnético se emplean mapas con líneas de igual intensidad del campo o igual inclinación o declinación.

El dipolo (fig. 10-2) de la Tierra se puede imaginar —para describir el campo magnético terrestre en el espacio exterior— suponiendo la existencia de una barra magnética en las proximidades del centro del planeta (para 1955): se halla desplazado 436 km con respecto del centro de la Tierra en una dirección que señala a un punto situado en la superficie terrestre a 15,7° de latitud norte y 150,8° de longitud este e inclinado unos 11,4° con respecto al eje de rotación; el polo sur señala en esa dirección 79° de latitud norte y 70° de longitud oeste.[18] Este imán debería tener un momento magnético[19] $M = 8{,}06 \times 10^{25}$ Gauss cm^3 ($8{,}06 \times 10^{21}$ teslas cm^3) y determinaría en la superficie terrestre intensidades del campo de 30 microteslas en el ecuador y de unos 60 microteslas, aproximadamente, en el polo.

En el campo magnético terrestre, al igual que en el gravitatorio, existen anomalías. Éstas pueden estar causadas por depósitos de material magnético (p. ej., yacimientos de mineral de hierro en las proximidades de Kiruna, en el norte de Suecia). El campo creado por estos depósitos sólo alcanza en muy pocos casos las dimensiones del campo dipolar. La anomalía más intensa se encuentra en Kursk, a 400 km al sur de Moscú. Una anomalía regional es la denominada anomalía de Sudamérica, donde el campo magnético superficial sólo alcanza 25 microteslas. Estas alteraciones regionales son una consecuencia de los sistemas de corrientes del núcleo exterior de la Tierra, y tienen mayor extensión espacial que las anomalías locales.

También existen variaciones temporales del campo magnético terrestre. Las variaciones de pocas horas de duración se producen como consecuencia de las tempestades magnetosféricas parciales, sobre las que hablaremos más detalladamente

[18] En 1965 los polos se encontraban en las siguientes posiciones polo sur 100,75ºO-75,6ºN; polo norte 140ºE-66,5ºS.

[19] Para caracterizar el campo magnético de un cuerpo se emplea el concepto de «momento magnético» A partir de él se obtiene, por ejemplo, la intensidad del campo magnético en la superficie de un planeta en el ecuador dividiéndolo por la tercera potencia de la distancia del centro del planeta.

al describir la magnetosfera (cap. 13). Las tempestades magnéticas determinan variaciones de varios días de duración.

Los sistemas de corrientes de la ionosfera dan lugar a una variación diurna del campo magnético en días que, de lo contrario, son «tranquilos». El Sol también es responsable de ello: los cambios provocados a lo largo del día en la ionización de la ionosfera por la llegada de rayos X y la luz ultravioleta solares forman corrientes por un efecto de dinamo. El calentamiento y las mareas producidas por el Sol y la Luna ponen masas de aire en movimiento. Estas cargas eléctricas en movimiento en relación con el campo magnético corresponden a una corriente eléctrica que, a su vez, ejerce también su influencia (a través del campo magnético que la acompaña y de otros producidos por corrientes inducidas). El sistema de corrientes que determina esta variación diurna se encuentra entre 100 y 150 km de altitud; está fijo con respecto a la dirección Tierra-Sol y la Tierra gira bajo él.

Las variaciones seculares (con períodos mucho más largos) transcurren en el campo magnético terrestre más rápidamente que en el potencial de gravitación o en la rotación de la Tierra. El desplazamiento del eje dipolar unos 0,5 de latitud por año, que corresponde a un período de rotación propia del campo dipolar de ~600 años, es, posiblemente, una expresión de este período. A partir de la orientación de las rocas magnetizables en la corteza terrestre se sabe que la dirección del campo magnético de la Tierra no sólo no ha sido siempre la misma, sino que incluso se ha invertido en repetidas ocasiones.

El componente mineral más importante para el magnetismo de las rocas es la magnetita (Fe_3O_4). La magnetización remanente es principalmente una magnetización «congelada»: cuando las rocas se enfrían en el campo magnético terrestre, los cristales del material se ordenan según el campo magnético dominante. Con temperaturas mucho más bajas se mantiene la dirección de la magnetización, y ello incluso cuando varía posteriormente el campo exterior. Esto puede haber ocurrido en la solidificación de la corteza terrestre o de la lava tras las erupciones volcánicas e incluso en las rocas sedimentarias. En tales casos las partículas minerales se orientan en la dirección del

campo magnético exterior. Determinando la edad de estas rocas (empleando, p. ej., el método de la desintegración radiactiva) se puede conocer también el momento en que se ha invertido el campo magnético terrestre.

En la actualidad se distinguen cuatro épocas, cada una, de las cuales duró aproximadamente un millón de años y en cada una de ellas probablemente se invirtiera el campo magnético terrestre. La inversión afectó no sólo a la parte dipolar del campo magnético, sino también a la no dipolar. Estas épocas estuvieron separadas por períodos de tiempo más cortos en los que el campo sufrió variaciones breves antes de permanecer de nuevo en una posición de casi total estabilidad durante más tiempo. Pero existen también indicios de variaciones del campo con escalas temporales de ~100 millones de años. A partir del estudio de las direcciones del campo magnético «congeladas» en las rocas de diversos continentes se pueden obtener indicios sobre las desviaciones continentales que, conocidas a través de mediciones magnéticas, fueron considerables en el hemisferio sur.

En el caso de la Luna se ha pensado también en un enfriamiento en el campo magnético exterior para explicar la ausencia de un campo magnético propio y, al mismo tiempo, la fuerte magnetización local en el enigmático mascon. Pero dado que el campo magnético terrestre no era mucho más intenso que hoy y que tampoco existen indicios de la existencia de un campo magnético solar extremadamente intenso, tenemos que descartar esta posibilidad.

¿Cómo se explica el origen del campo magnético terrestre? «La Tierra como imán permanente»: esta explicación, la más sencilla, queda descartada, pues a tan sólo 50 km de profundidad la temperatura del material es ya superior al denominado «punto de Curie» (temperatura por encima de la cual todos los materiales ferromagnéticos —también el hierro— pierden sus características magnéticas). Así pues, el campo magnético tiene que estar producido por corrientes eléctricas. Una corriente eléctrica que fluye por un alambré crea un campo magnético que rodea a éste de forma circular. Si existieran muchos alambres juntos, todos ellos recorridos por una corriente en la

misma dirección, se compensarían los campos magnéticos; bien es verdad que por encima y por debajo de la capa de alambres («capa de corriente») se forman campos magnéticos «homogéneos» de dirección opuesta. Si el material conductor se mueve en relación con un campo magnético, comienza a fluir corriente (es «inducida»), que a su vez crea un nuevo campo magnético opuesto al primario. Este sistema está organizado de modo que, una vez en movimiento, se pararía por sí solo si no existiera una fuerza motriz que mantuviera ese estado.

La única fuerza capaz de producir este efecto estabilizador en el campo magnético terrestre es la rotación de la Tierra. Fijémonos por un momento en la rotación terrestre: el momento de inercia (principal) de la Tierra es de $8{,}118 \times 10^{44}$ g cm^3; para la energía acumulada en la rotación se obtiene con ello un valor de $2{,}2 \times 10^{36}$ ergios o $6{,}1 \times 10^{22}$ kWh, El mismo valor se presenta en el impulso de giro de la Tierra La física nos enseña que el impulso de giro de los sistemas cerrados (la Tierra es, en este sentido, un sistema cerrado) tiene un carácter constante (el patinador sobre hielo que, al realizar una pirueta, hace más lento su giro al extender los brazos, esto es, al aumentar su momento de inercia, actúa según este principio). Sin embargo, el impulso de giro puede ser modificado por una fuerza externa (p. ej., la fuerza de gravitación del Sol) o por el impacto de un meteorito. Con todo, para determinar una variación apreciable de la situación del eje de rotación tiene que tratarse de un cuerpo muy grande (de muchos kilómetros de diámetro).

El núcleo terrestre fluido tiene una conductividad eléctrica específica muy elevada (2×10^5 siemens/m). Una corriente que fluya por un conductor de este tipo disminuirá con un período de semidesintegración de aproximadamente 30.000 años: en el material en cuestión la energía eléctrica se transforma en calor como consecuencia de su resistencia. En el límite exterior del núcleo, el campo magnético tiene una intensidad de 0,5 microteslas; en el núcleo posiblemente sea superior. Según estimaciones recientemente realizadas se calcula que en el interior de la Tierra la energía magnética es de 4×10^{21} julios. Con el período de semidesintegración de 30.000 años ($\sim 10^{12}$ s) antes mencionado tiene que producirse continuamente nueva energía

magnética, y ha de hacerse a un ritmo de 4×10^9 julios/s, lo que equivale a un rendimiento de 4 millones de kilovatios Así pues, en el interior de la Tierra se utiliza continuamente el rendimiento de una gran central eléctrica para producir la energía con que se mantiene el campo magnético. Por otro lado, en la corteza terrestre el flujo térmico presenta un valor de 50 mW/m^2. Esto equivale a una pérdida de energía térmica de 10^{13} julios/s. De ello se deduce que en la actualidad sólo se emplea para producir energía magnética una pequeña parte de las pérdidas térmicas que experimenta la Tierra. Las corrientes del núcleo pueden estar impulsadas por convección térmica al tiempo que la fuerza de Coriolis —determinada por la rotación de la Tierra (v. apéndice 6)— limita las fuerzas hidrodinámicas (y con ello la intensidad del campo magnético).

El eje de rotación de nuestro planeta no es totalmente perpendicular a la eclíptica. Sobre la Tierra achatada influyen también las fuerzas de gravitación del Sol y de la Luna, lo que determina el ya mencionado movimiento de precesión del eje terrestre. La Tierra se deforma continuamente debido a su elasticidad. Las variaciones del momento de inercia provocan inevitablemente, como en el patinador sobre hielo, pequeñas oscilaciones del período de rotación.

Estas desviaciones con respecto a la simetría y la regularidad son importantes condiciones para el mantenimiento del campo magnético terrestre. Por otro lado, esta circunstancia hace que la rotación de la Tierra no resulte especialmente indicada para medir el tiempo.

El núcleo terrestre se comporta mecánicamente como un fluido, y en él la convección es una causa necesaria para los movimientos de masas, sobre los cuales la rotación terrestre influye a través de la fuerza de Coriolis. Pero la convención térmica del material del núcleo puede tener efectos inductivos. En un conocido teorema, T. G. Cowling, físico norteamericano, demostró en 1934 que los campos magnéticos con simetría axial no pueden ser inducidos por un movimiento con esta simetría por parte de los fluidos conductores de la electricidad. En consecuencia hay que suponer que en el núcleo existe un intenso campo acimutal organizado por la fuerza de Coriolis

—ésta influye sobre las corrientes de convección— y que no puede existir fuera del núcleo conductor. El físico norteamericano W. M. Elsasser demostró en 1946 que la energía magnética está efectivamente relacionada con este campo acimutal, lo que, debido a la rotación irregular del planeta, unida a una convección irregular, forma el campo dipolar, que domina en el exterior debido a su lenta disminución. Este proceso hidrodinámico cuenta con una buena base teórica y desempeña un papel importante como proceso parcial en modelos de estrellas, galaxias, etc. (también es verdad que algunos «detalles» precisan una explicación).

Hasta ahora sólo hemos hablado de que se precisa un núcleo fluido, conductor de la electricidad, así como un planeta en rotación.

A continuación vamos a ver cómo los períodos de extinción de los campos magnéticos de todos los planetas son más cortos que la edad de estos planetas. La consecuencia es que el campo magnético no puede haber llegado del exterior y no puede ser un campo magnético «primordial» (existente, por tanto, en el entorno) capturado durante un colapso gravitacional. Como hemos visto, el campo tiene que producirse continuamente y sus pérdidas deben ser equilibradas sin cesar. Los núcleos de otros planetas no pueden estar permanentemente magnetizados, pues las temperaturas superan el punto de Curie.

¿Qué ocurre en otros planetas?

Es evidente que en el campo magnético de un planeta desempeñan un papel importante la rotación y la conductividad eléctrica del núcleo y, por consiguiente, también su composición química. Esto nos hace pensar que los planetas interiores (o terrestres, esto es, similares a la Tierra) presentan características comparables. Hoy se parte de la consideración de que todos los planetas terrestres tienen núcleo.

Estos núcleos deben ser ricos en hierro y contener níquel y algunos elementos ligeros. Pese a todo, la incertidumbre en relación con la composición química del núcleo constituye uno de los motivos por los que resulta difícil perfeccionar los modelos. El núcleo de Júpiter podría ser hidrógeno metálico, que llena entre 0,71 y 0,75 radios de Júpiter del volumen total del

planeta y cuya conductividad eléctrica podría situarse en 2×10^5 siemens/m. Su radio de 7×10^4 km y su momento magnético de $1,55\times10^{26}$ teslas/cm^3 dan como resultado un campo superficial de 0,3-0,4 militeslas en el ecuador. El eje dipolar muestra una inclinación de unos 10° con respecto al eje de rotación. La constante del tiempo de disipación del núcleo podría ser superior a la de la Tierra. Si, aplicando valores análogos a los terrestres, establecemos una intensidad del campo magnético de 0,05 teslas en el borde del núcleo, obtenemos una energía magnética global del planeta de 2×10^{26} julios. Comparada con el calor disipado hacia fuera de $6,4\times10^{17}$ julios/s, la energía necesaria para mantener el campo magnético sería bastante menor. Curiosamente, la radiación térmica de Júpiter es superior a la energía recibida del Sol.

El campo magnético de Júpiter tiene considerables componentes no dipolares, como han demostrado las mediciones realizadas por las sondas espaciales estadounidenses Pioneer 10 (4.12.1973) y 11 (3.12.1974) y Voyager 1 (5.3.1979) y 2 (9.7.1979). Es posible que esta circunstancia se halle relacionada con la localización del núcleo a escasa profundidad por debajo de la superficie del planeta.

Dado que Saturno es, al igual que Júpiter, una radiofuente muy intensa, podemos hacer una estimación de su campo magnético. Sin embargo, las mediciones realizadas por la sonda Pioneer 11 el 1 de septiembre de 1979 dieron como resultado un valor algo inferior, que un año después fue confirmado por la sonda Voyager: el momento magnético es de 4.6×10^{24} teslas/cm^3, y el campo superficial de 22 microteslas. Si comparamos esta situación con la de Júpiter, hay que fijar para el núcleo un valor del 54% del núcleo de este último, lo que corresponde a un radio del núcleo de ~28.000 km. El campo magnético de Saturno es más parecido a un dipolo que el de Júpiter (lo que no resulta sorprendente tras lo antes dicho: los componentes no dipolares han desaparecido en seguida de un núcleo poco profundo). La mayor sorpresa fue, sin embargo, comprobar que el eje magnético apenas está inclinado con respecto al eje de rotación (0,7 ±0,35 grados). El centro magnético tiene que estar

desplazado 0,02 radios de Saturno con respecto al centro de la masa.

Urano y Neptuno poseen campos magnéticos, cuyos momentos se determinaron durante el paso de las sondas Voyager (1986 y 1989) y cuyos valores son de $3,86 \times 10^{23}$ y $2,02 \times 10^{23}$ teslas/cm^3. En ambos planetas sorprendió el gran ángulo entre el eje magnético y el eje de rotación (60° o 47°), así como el gran desplazamiento de los dipolos magnéticos equivalentes respecto del centro del planeta. Respectivamente varía el campo en la superficie de ambos planetas (p. ej., en la superficie de presión constante de 1 bar) entre los valores de 0,2 y 12 militeslas.

Desde la misión de las sondas soviéticas Fobos alrededor de Marte, en la primavera de 1989, se cree que el planeta posee un campo magnético propio. Al campo interno está superpuesto un campo inducido de intensidad comparable. La topología del campo magnético de Marte es por ello realmente compleja. El momento magnético interno se estima en aproximadamente 8×10^{18} teslas/cm^3.

La densidad media de Marte supone el 72% de la de la Tierra (5,52 g por cm^3) y su período de rotación es casi igual al terrestre. Todo ello nos lleva a la conclusión de que Marte tiene un pequeño núcleo fluido (aun cuando no se puede descartar la posibilidad de que exista un núcleo sólido). Si Marte poseyera un campo magnético propio, debería tener un núcleo fluido, pues de lo contrario no se podría crear campo alguno. Sin embargo, el tiempo de disipación sería menor que el del campo terrestre y alcanzaría un valor de aproximadamente 3.000 años (10^{11} s). A partir del campo superficial se deduce el valor de 1 gauss en el límite del núcleo; de la teoría se infiere, con el intenso campo acimutal en el núcleo, una energía magnética global de 2×10^{16} julios. Esto aboca en un índice de disipación de unos 10^5 julios/s, lo que equivale a un rendimiento de varios cientos de kW. Por ello, se puede suponer que la energía necesaria para mantener el campo magnético es pequeña para los recursos térmicos del planeta Marte. De cualquier modo, es posible que la ausencia de un campo dipolar intenso en Marte y

Venus haya que atribuirla a que su resistencia mecánica es mayor, por lo que la rotación es más regular, con lo que resulta más reducida la creación de un dipolo en un proceso dinámico.

Las mediciones del campo magnético realizadas durante los pasos por Venus (Mariner 2 en diciembre de 1962, Mariner 5 el 19 de octubre de 1967, Venus 4, Venera 9 y 10 el 22 y el 25 de octubre de 1975) y por el Pioneer Venus Orbiter (a partir del 4 de diciembre de 1978) establecen para el campo en la superficie del planeta un límite superior de 1.000 nT, por lo que el momento magnético debe ser inferior a 10^{18} teslas/cm^3. Si Venus tuviera la misma estructura que la Tierra, cabría esperar que poseyera un campo considerablemente más grande. La rotación más baja no explica por sí sola el hecho. Por ello, hay que deducir que la convección del núcleo en el interior no es suficiente para impulsar la dinamo, que la conductividad eléctrica del material es diferente (posiblemente también lo sea la composición química) o que, como ya se ha dicho, la mayor regularidad de la rotación «desacopla» menos campo dipolar.

Debido a su bajo índice de rotación, la Luna no puede tener un campo magnético intenso. Pero como además es muy posible que no posea un núcleo fluido, ni siquiera cuenta con un campo magnético, tal como lo han confirmado las investigaciones. Así pues, la Luna parece estática: hoy está muerta y nunca ha estado especialmente «viva». La magnetización de las rocas lunares existe, probablemente, desde hace 4.000 millones de años y no procede de una dinamo antes activa.

Mercurio, en cambio, sí tiene campo magnético, como ha demostrado la sonda espacial Mariner 10 (marzo 1974-marzo 1975). Su momento dipolar es de $3,3 \times 10^{18}$ teslas/cm^3, está desplazado 0,47 radios de Mercurio con respecto al centro y muestra la misma orientación que el de la Tierra, estando también inclinado con respecto al eje de rotación. Es de suponer que en el ecuador existe, por tanto, un campo superficial de 0,3 microteslas. A diferencia de nuestro planeta, cuya densidad media es prácticamente igual a la de Mercurio, su radio más pequeño nos hace deducir la existencia de un núcleo metálico relativamente grande (~1.800 km de radio), para cuya conductividad se cal-

cula el mismo valor que en la Tierra, con lo que se llega a tiempos de extinción comparables (10.000 años). Su energía magnética se ha estimado en 6×10^{21} ergios, con lo que se obtiene una pérdida magnética de unos 3 kW.

Así pues, en los planetas sobre los que disponemos de información hemos visto que las constantes del tiempo de extinción son claramente inferiores a la edad del astro correspondiente y que la energía de los campos magnéticos es inferior a la energía acumulada en la rotación de los planetas, de la que se alimentan.

XII. LAS ATMÓSFERAS DE LOS PLANETAS

La materia en estado gaseoso que rodea a un cuerpo celeste recibe el nombre de atmósfera (En el caso del Sol se utiliza en los últimos tiempos el término «atmósfera» para designar la capa gaseosa situada por encima de la fotosfera, aunque ésta es también gaseosa.) Las atmósferas pueden haberse formado de diferentes modos: en primer lugar, durante la condensación del planeta existe la posibilidad de que se haya «capturado» gas de la nebulosa solar. En segundo lugar, es factible que durante la condensación escapara poco a poco gas del interior del cuerpo sólido. En tercer lugar, un planeta «desnudo» ha podido capturar en un momento dado un cometa de tamaño considerable que, al calentarse, se evaporizó y se transformó en la atmósfera. En la actualidad no podemos descartar definitivamente ninguna de estas tres hipótesis, todas plausibles, si bien algunas en mayor medida que otras (v. cap. IX).

La composición de la atmósfera determina notablemente su estructura térmica (fig. 12-1) y su dinámica. La energía que se transforma en la atmósfera procede de lo que el Sol envía al planeta y de lo que éste cede a su atmósfera. A ello se une la energía «derivada» de la energía de rotación del planeta (mareas de la atmósfera) y lo que —directa o indirectamente— añade el viento solar.

El estudio de las atmósferas de los planetas comienza con la recogida de informaciones básicas: composición, presión y variación de la temperatura con la altitud, sistemas de vientos. El paso siguiente, más complejo, consiste en explicar la cinética química, el transporte del calor, la dinámica, la historia y la evolución. Para resolver estas cuestiones es preciso emplear un amplio espectro de métodos, con el fin de llegar a afirmaciones seguras. La atmósfera que mejor conocemos es, naturalmente, la de la Tierra, si bien en los últimos años se han expli-

cado numerosos detalles en relación con Venus, Marte y Júpiter (Mercurio y la Luna no poseen auténticas atmósferas), así como en relación con los planetas Urano y Saturno (con la ayuda de la sonda Pioneer 11 y las dos sondas Voyager). A continuación vamos a ocuparnos con más detalle de la atmósfera terrestre, para estudiar al final brevemente las de otros planetas.

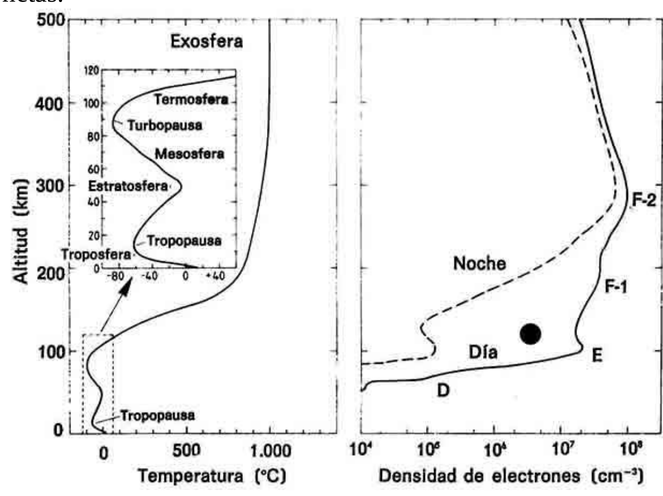


Fig. 12-1. Izquierda, temperatura de la atmósfera La atmósfera se divide en diferentes capas de acuerdo con la variación de la temperatura: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. Para designar a las zonas en las que la temperatura alcanza valores extremos se habla, en la terminología geofísica, de tropopausa, estratopausa, turbopausa (o mesopausa). La zona situada por encima de 500 km se denomina a menudo exosfera. Derecha: densidad de electrones libres en la atmósfera; la estructura de la ionosfera.

El modelo más sencillo de una atmósfera se obtiene cuando se supone la existencia de un equilibrio hidrostático (v. nota al pie 17). Tal suposición no se ajusta a la realidad, pues una atmósfera está constituida por un complejo sistema de procesos físicos y químicos en equilibrio dinámico. Estos procesos adquieren una importancia diferente según la densidad (esto es. según la altitud). La composición en las capas próximas al suelo es la siguiente: 78% N_2 (nitrógeno). 21% O_2 (oxígeno),

apenas 1% de argón, así como vestigios de hidrógeno (H_2), neón (Ne), xenón (Xe), criptón (Kr) y helio (He). A estos componentes se unen un contenido en anhídrido carbónico (CO_2) que oscila en un 0,3% y un contenido en vapor de agua (H_2O) que varía entre un 0 y un 4% en el tiempo y el espacio.

La idea del equilibrio hidrostático nos lleva a una disminución exponencial de la densidad con la altura. Esta disminución se describe con la ayuda de la escala de altitudes, que representa al mismo tiempo la relación entre la gravedad y la energía térmica. De este modo se llega a una división de la atmósfera en capas, dominando los gases pesados en las inferiores y los ligeros en las superiores. Sin embargo, en la parte inferior la turbulencia se encarga de mezclar de un modo regular la atmósfera, viéndose activada por la energía solar: la radiación del Sol determina un calentamiento local del suelo, con lo que se produce una convección. Las masas de aire que ascienden no intercambian calor con su entorno, por lo que llegan calientes a una zona fría.

El sistema —masa de aire ascendente y entorno— se vuelve en un momento dado inestable y suele acabar en unos movimientos irregulares (turbulencia). Esta mezcla turbulenta de la atmósfera tiene su límite a unos 100 km de altitud (turbopausa, fig. 12-1). Éstos y otros movimientos de la atmósfera son activados por numerosos procesos de transformación de la energía (fig. 12-2). La energía primaria es aquélla que ha sido emitida por el Sol; tiene 0,136 vatio/cm^2 (constante solar) y oscila ±3,4% con carácter estacional debido a la excentricidad de la órbita terrestre (perihelio: 2 de enero; afelio: 2 de julio). En la actualidad se discute a menudo hasta qué punto es realmente «constante» la constante solar, sugiriéndose que bien puede variar con el tiempo (v. capítulo V). La energía existente en la atmósfera de un hemisferio es, según estimaciones de A. H. Oort, de $1{,}5 \times 10^{17}$ kWh (!). En un ciclón se transforma una energía de 5×10^{12} kWh; en un huracán, de 5×10^{11} kWh. El consumo de energía mundial es de unos 10^{12} kWh por año (una cifra alarmante) y la bomba de hidrógeno más potente que se ha activado desarrolló una de 5×10^{16} kWh. En una buena medida, la energía transformada por el hombre se convierte en

energía térmica, esto es, pasa fundamentalmente a la atmósfera.

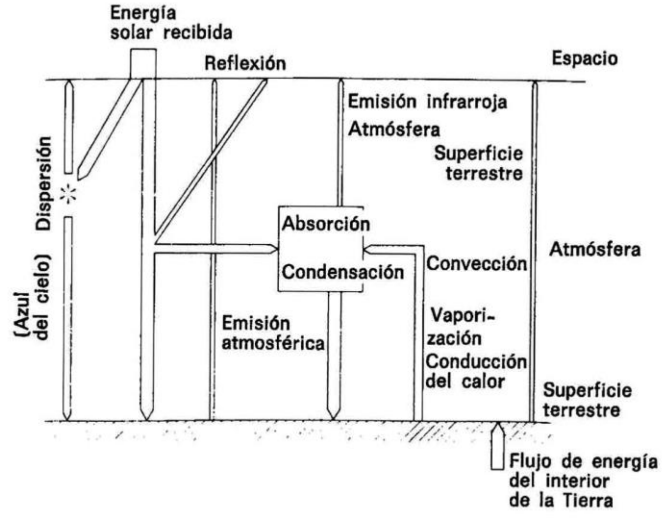


Fig. 12-2. Balance de energía de la atmósfera: la energía solar en parle se absorbe y en parte se dispersa. Por su parte, la radiación que llega a la superficie terrestre se absorbe parcialmente o bien se refleja. Una porción de la radiación reflejada también se absorbe. De este modo se constituye un complejo sistema de equilibrio, cuyo balance se modifica por la variación de la radiación, por la variación de la composición o por la alteración de la transparencia

La atmósfera se divide en diversas zonas de acuerdo con la variación de la temperatura determinada por la altitud (fig. 12-1). La región inferior se denomina troposfera y según aumenta la altitud desciende la temperatura hasta llegar a la denominada «tropopausa», en la que aquélla baja a –50°C. Luego vuelve a aumentar en la estratosfera (mesosfera), hasta alcanzar +10°C a unos 50 km de altitud. Este aumento de la temperatura se debe, ante todo, a la absorción de la radiación solar ultravioleta por el ozono, O_3. A mayor altitud vuelve a descender de nuevo la temperatura hasta la turbopausa (~100 km), para luego ascender otra vez como consecuencia de la absorción de la luz solar de onda corta, sobre todo por el oxígeno en la termosfera

hasta alcanzar la temperatura de la «exosfera». A esta altitud el «recorrido libre medio» de las moléculas (camino que recorren hasta chocar con otras partículas) es de 100 km. Así pues, las moléculas no tienen ya por encima más átomos o moléculas que les impidan ver el espacio exterior. Esta altitud «crítica» se sitúa en torno a los 400 km. Un átomo puede ser eventualmente empujado desde abajo y si su velocidad es suficientemente elevada, salir al espacio exterior. A esta velocidad, una molécula de masa *m* tiene que salvar el campo de gravitación terrestre (su energía cinética ha de superar la energía gravitacional: $1/2\ mv^2 > KmM/r$, siendo *K* la constante gravitacional y *M* la masa de la Tierra). En la superficie de nuestro planeta esta velocidad es de 11,2 km/s, y a 400 km de altitud de «sólo» 10,8 km/s.

La absorción se produce fundamentalmente a través del vapor de agua, el anhídrido carbónico, el oxígeno, el nitrógeno y el ozono. Aquélla que se realiza por el suelo terrestre presenta oscilaciones locales y temporales (verano/invierno). El 96% de la energía de la luz solar tiene una longitud de onda entre 0,3 y 3 µm, de tal forma que el infrarrojo y los rayos X contribuyen poco al flujo de energía. El albedo de la Tierra —la parte de la radiación reflejada por el planeta— es, por término medio, del 30%; en el polo sur alcanza el 65%, en el polo norte el 50% y en las altitudes bajas es más reducido. Sólo el 16% de la radiación solar se absorbe y se dispersa directamente en la atmósfera. El resto llega a la superficie terrestre que, sin embargo, refleja también una parte de la luz. La dispersión se produce en los átomos y en las moléculas, pero también en las gotitas de agua de las nubes o en los cristales de hielo y en el polvo. La dispersión en las moléculas es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda de la radiación (ley de Rayleigh). Por ello se difunde más el componente azul de la luz, de onda corta, lo que hace que desde la Tierra veamos el cielo siempre azul.

A altitudes superiores a 160 km, la parte ultravioleta de la luz solar (longitudes de onda inferiores a 2.000 Å) «disocia» el oxígeno, de tal manera que, la «molécula» de oxígeno O_2 se descompone en dos «átomos» de oxígeno, O. La energía liberada de los productos de disociación contribuye al movimiento

térmico de los átomos (así se define allí la «temperatura»: movimiento desordenado, irregular, de átomos y moléculas con velocidad «térmica»).

En la termosfera (fig. 12-1), la temperatura aumenta con la altitud hasta que se alcanza un estado de equilibrio. La radiación térmica de la molécula y del átomo de oxígeno dominante es muy reducida, y también lo es la conductividad térmica del gas; como no existen otros procesos para conseguir un equilibrio térmico, la temperatura aumenta hasta que son efectivos los procesos de pérdida, pues, por un lado, la radiación aumenta con la temperatura y, por el otro, la conducción del calor es más efectiva cuanto mayor resulta el gradiente de la temperatura con la altitud. En consecuencia, la temperatura alcanza en la termosfera, a varios cientos de kilómetros de altitud, valores en torno a 1.000°K.

Resulta extremadamente difícil tratar teóricamente las capas altas de la atmósfera, pues hay que resolver un complejo sistema de ecuaciones: la del balance de energía, la del balance del impulso y la del balance de las masas, para todos los constituyentes, los neutros y los ionizados. También interviene la complicada química de las capas altas de la atmósfera, en la que desempeñan un importante papel las reacciones que en el suelo sólo podemos desarrollar en parte, como los pasos de radiación «prohibidos» en los átomos estimulados o los choques reactivos entre partículas con carga eléctrica y partículas neutras.

Nos gustaría resolver estas ecuaciones, pero, dado que a ello se suma la variabilidad temporal, lo máximo a lo que se puede aspirar es a describir el estado de la atmósfera bajo determinadas condiciones. Sin embargo, esta esperanza resulta modesta, pues las primeras magnitudes —esto es, el flujo de energía del Sol— sólo se pueden medir con costosos aparatos desde los satélites terrestres. La radiación de radio del Sol de 10,7 cm de longitud de onda, utilizada en ocasiones como medida para el flujo de energía, constituye, como se sabe hoy en día, sólo una vaga aproximación.

Como hemos visto anteriormente, los gases pueden escapar del campo de atracción de un planeta: los planetas son (o han

sido) fuentes del gas neutro que existe en el espacio interplanetario. El escape resulta posible cuando la molécula supera la velocidad característica de su altitud (y se mueve en sentido ascendente). Aunque no todas las moléculas tienen la misma velocidad, ésta no presenta valores caprichosos. Dado que los átomos y las moléculas chocan entre sí, los rápidos pierden velocidad traspasándola a los lentos, de modo que las velocidades se distribuyen en un determinado ámbito. Cuanto más alta es la temperatura, más extenso es el ámbito. En física se define este reparto de la velocidad mediante una «distribución de Maxwell»» (recibe el nombre del gran físico inglés J. Clerk Maxwell), en la que una función exponencial es el término más importante (en el exponente para los gases atmosféricos se encuentra la relación entre la energía gravitacional y la térmica).

De este modo se puede saber cuál va a ser el índice de pérdida de gases con una distribución dada de la densidad y la temperatura. Esto nos permite demostrar que en espacios de tiempo geológico (esto es, millones de años) con temperaturas de 500°K, de las capas altas de la atmósfera sólo puede escapar hidrógeno, mientras que el nitrógeno y el oxígeno sólo escapan a 6.000°K. Con ello se obtienen las condiciones generales para las temperaturas máximas que han podido reinar en las atmósferas de los planetas. La atmósfera terrestre se vaporizaría si la temperatura de la superficie del Sol superara los 10.000°K. Por otra parte, la temperatura de la superficie solar no ha debido rebasar nunca el valor actual, pues en tal caso hoy no tendrían atmósfera ni Venus, ni la Tierra, ni Marte. Con todo, tampoco ha podido situarse muy por debajo del valor actual, ya que entonces nuestra atmósfera tendría un mayor contenido de hidrógeno. Así pues, estas condiciones nos proporcionan puntos de referencia sobre el comportamiento de los planetas y del Sol en tiempos pasados.

Existen moléculas, principalmente hidrógeno, que pasan de las capas altas de la atmósfera al espacio exterior describiendo órbitas balísticas, como los cohetes, y que posteriormente regresan de nuevo a la Tierra. En estas órbitas, las partículas pueden alcanzar altitudes de 10.000 km. Ello nos lleva a la idea de que la Tierra está envuelta por una importante capa de gas,

compuesta sobre todo de hidrógeno neutro —no en vano el tiempo de permanencia de los átomos en esta capa es menor que el tiempo medio necesario para que los átomos se ionicen—. Esta capa recibe el nombre de geocorona. A 500 km de altitud, la densidad de los átomos de hidrógeno en la geocorona varía con la actividad solar, hasta en un factor dos, disminuyendo bruscamente con la altitud (de 100 a 1.000 km lo hace en un factor 10^8). Debido a la estimulación de los átomos de hidrógeno, éstos brillan en la luz de la línea alfa de la serie de Lyman del espectro del hidrógeno. Este brillo es débil, pero se observa perfectamente desde, por ejemplo, los satélites. La Tierra con su atmósfera constituye para la luz solar un disco de radio R. Todo cuerpo emite un espectro de radiación electromagnética cuyo reparto de la energía está determinado por su temperatura. En el caso del planeta Tierra, la temperatura es, por término medio, de 255° K. El máximo de radiación se halla, por tanto, en el infrarrojo lejano. La longitud de onda con la que se produce el máximo de la radiación se obtiene a través de la «ley de Wien»:

$\lambda_{máx} \times T = 0{,}289$ (cm grado), debiéndose indicar T en la escala absoluta (grados Kelvin). El máximo de la emisión de la Tierra se encuentra de este modo para una longitud de onda de 11,3 µm, que corresponde al rango del infrarrojo. La radiación es proporcional a la superficie de la esfera de radio R.

Mientras que en la superficie terrestre la energía de la radiación absorbida es superior a la emitida en el campo del infrarrojo, en la atmósfera ocurre lo contrario. El exceso de energía en el suelo es evacuado a través de la evaporación del agua y de la conducción del calor; el calor de la evaporación se libera durante la formación de las nubes como calor de condensación y, de este modo, es devuelto a la atmósfera.

Las mediciones realizadas con la ayuda de los satélites terrestres en los últimos años nos han permitido conocer numerosos detalles acerca de este complejo sistema de radiaciones de la atmósfera. En las regiones próximas a los polos, por encima de 35 grados de latitud, el sistema Tierra + atmósfera emite en infrarrojo más energía de la que absorbe del Sol (fig. 12-3), mientras que en las zonas próximas al ecuador ocurre lo

contrario. Esto significa que debe existir un continuo transporte de energía desde el ecuador a los polos; ésta sería la causa principal del dinamismo de la atmósfera. Los océanos también participan en este transporte de energía (corriente del Golfo). En la atmósfera, el transporte sigue una dirección meridiana impulsado por el gradiente térmico que existe entre el ecuador y los polos. De cualquier modo, de todos es sabido que la actividad humana ha determinado en los últimos veinte años alteraciones en el contenido de CO_2 y ozono de la atmósfera. En el capítulo V nos ocupamos ya del problema del CO_2.

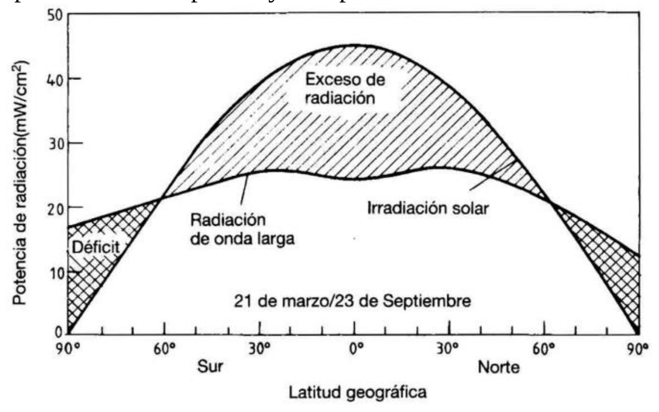


Fig. 12-3. La intensa absorción que tiene lugar en las latitudes bajas es muy importante para el balance de la radicación atmosférica. Dado que en las latitudes altas predomina la irradiación, existe un transporte de energía de las latitudes bajas a las altas en forma de un importante sistema de corriente meridional.

Ahora vamos a tratar lo que llamaremos el «problema del ozono». El ozono (O_3) se forma por la fotodisociación del oxígeno, es decir, por la disgregación de las moléculas de oxígeno bajo la influencia de la luz con una longitud de onda inferior a 0,232 pm. La densidad del ozono alcanza un máximo a 25 km de altitud: 10^{13} moléculas de ozono por cm^3. Esta «pizca» de ozono absorbe el 99% de la luz solar ultravioleta en longitudes de onda inferiores a 0,32 μm. Una parte (25%) es degradada de nuevo de forma natural por el N_2O (óxido nitroso) producido por las bacterias del suelo, que se oxida formando óxido nítrico

(NO) y actúa como catalizador. Así pues, existe un equilibrio entre los procesos de producción y destrucción del ozono.

Al principio de la década de los setenta se empezaron a escuchar las primeras voces de alarma referidas al hecho de que los gases «inertes» (es decir, gases de poca reactividad química y que. por tanto, no dan lugar a ningún efecto fisiológico sobre el ser humano), cuyo uso se ha generalizado, entre otros, en los pulverizadores («spray»), se difunden hacia las capas altas de la atmósfera y que son capaces de destruir el ozono de la estratosfera. Estos hidrocarburos halogenados son destruidos por los rayos UV solares por encima de la tropopausa, de modo que, p. ej., se genera cloro libre (halógeno). En la estratosfera se destruye de este modo ozono debido a reacciones catalíticas con los halógenos y el monóxido de nitrógeno. Los aviones a reacción que cubren rutas que pasan por los polos transportan además monóxido de nitrógeno y vapor de agua directamente hasta la sensible estratosfera (la tropopausa desciende en las latitudes altas hasta aproximadamente 6 km de altitud). Por este motivo habría que prohibir este tipo de vuelos en todo el mundo.

Los gases inertes mencionados se conocen con el nombre de hidrocarburos clorofluorados (CFC), comercializados, entre otros, con los nombres de freón y kaltrón. Estos compuestos, que no se pueden destruir químicamente, son presa fácil de la «fotodisociación»: de la descomposición de las moléculas en sus componentes, sobre todo bajo la influencia de la luz ultravioleta. El átomo de cloro liberado en este proceso es oxidado a óxido de cloro por parte del ozono, con lo que la molécula de ozono queda destruida. Las moléculas de ozono se disocian también de forma natural a causa de la acción de la luz (longitud de onda inferior a 1.140 nanómetros). En este proceso se genera oxígeno atómico que es suficientemente agresivo como para arrancar el oxígeno del óxido de cloro, con lo que puede transformarse en una molécula de oxígeno. Finalmente, la destrucción de dos moléculas de ozono da lugar nuevamente al átomo de cloro libre inicial. Sin embargo, entre tanto, se sabe que en la estratosfera se verifica una serie de reacciones «cata-

líticas», en las cuales el «catalizador» no aumenta ni disminuye, al igual que el cloro en la reacción descrita arriba. En lugar de cloro se puede poner el monóxido de nitrógeno NO o bromo, o el radical hidroxilo OH; éstas son las reacciones que se producen. Por lo tanto, no debe considerarse sólo a los gases inertes responsables del proceso, ni tiene tampoco que asignársele un efecto tan grande como se había temido en un principio. Las trazas de otros reactivos están presentes en cantidades mucho mayores. Por consiguiente, su efecto es mucho mayor. Si se continúa e incluso se incrementa el consumo de CFC, aumentará su concentración en la estratosfera. La destrucción que experimenta el ozono a causa de ello supone globalmente en la actualidad un 1-2%. El «agujero de la capa de ozono» descubierto en la Antártida es una consecuencia más de dichas emisiones. La fabricación de estos gases debería prohibirse inmediatamente en todo el mundo. Un primer paso en este sentido se dio mediante el llamado «Protocolo de Montreal», que prevé una reducción escalonada de su producción, si bien el ritmo actual de la reducción es todavía insuficiente.

Cuando entran en la atmósfera, los protones lanzados por el Sol en las fulguraciones producen óxidos de nitrógeno. La mayor fulguración observada determinó en agosto de 1972, un aumento enorme de los óxidos de nitrógeno en la estratosfera y, con ello, una reducción de casi el 20% en la concentración de ozono en la región polar a altitudes inferiores a 45 km. La actividad humana también crea óxidos de nitrógeno que pasan a la atmósfera. Junto a los aviones cabe mencionar también las explosiones de bombas atómicas y la utilización de abonos químicos que ceden óxidos de nitrógeno a la atmósfera. Existen también reacciones que reducen la destrucción del ozono, como el paso del NO a NO_2 por oxidación dando un rodeo por el OH oxidado, esto es, H_2O, fenómeno que se produce sobre todo a escasa altitud. Todo ello deja ver lo complejos que son los procesos químicos que transcurren en las capas altas de la atmósfera, por lo que results muy difícil realizar previsiones fiables sobre el efecto de los elementos incorporados a ésta por la actividad humana.

A medida que aumenta la altitud se incrementa también el recorrido libre medio de las moléculas, y es mayor el tiempo que transcurre entre los choques. La radiación de onda corta y rica en energía solar ioniza átomos de tal forma que, debido a la vida más larga obtenida de este modo, pueden existir al mismo tiempo iones libres (esto es. átomos con carga eléctrica) y electrones libres. Con una mayor densidad de estos iones se recombinarían más deprisa con electrones. La estructura así formada adquiere unas características diferentes a las hasta ahora mencionadas: las partículas con carga ya no se mueven en línea recta, sino en órbitas circulares alrededor del campo magnético de la Tierra. Si se mueve el gas neutro, se «lleva consigo» el componente ionizado (y viceversa), y fluye una corriente (o sopla el viento). La radiación electromagnética cuya frecuencia se encuentra por debajo de la «girofrecuencia» (número de vueltas por seg de las partículas cargadas que se mueven alrededor del campo magnético) es reflejada por esta capa, que precisamente por ello ha recibido el nombre de ionosfera. Como la capa en cuestión refleja las ondas electromagnéticas, su existencia pudo descubrirse en los años veinte, recibiendo en un principio el nombre de su descubridor. Heavyside. La influencia de la ionosfera sobre las ondas electromagnéticas permitió realizar con estas ondas un estudio detallado de la estructura de la zona (mediciones con sondas acústicas, estimaciones de la absorción, reflexiones parciales, etc.): se mide la concentración de los electrones para, a partir de ella, deducir la de los iones.

La concentración de electrones aumenta con la altitud (v. fig. 12-1). La zona comprendida entre 50 y 90 km de altitud se denomina por motivos históricos región D. Una estructura en la que un parámetro alcanza un máximo puede ser considerada, por regla general, como una «capa». Así, a la capa situada por encima de la región D. en torno a 100 km de altitud, se la denomina la capa E; justo por debajo de los 200 km de altitud se encuentra la capa F, y por encima de 250 km la capa F_2. ¿Cómo se forman estas capas?

Uno de los geofísicos más importantes de la edad moderna. Sidney Chapman explicó en 1931 esta cuestión de un modo

sencillo. Consideró la ionización del gas por la radiación ionizante, incluyendo la variación de la distancia del cénit del Sol a lo largo del día. De este modo se obtiene una intensidad de la radiación ionizante que dependiente del ángulo del cénit disminuye de forma exponencial a medida que aumenta la «profundidad atmosférica»; por otro lado, se halla una densidad del gas que disminuye de forma exponencial de abajo arriba. En principio hay que multiplicar entre sí estas dos funciones opuestas dependientes de la altitud. Entonces se observa que la ionización muestra un máximo a una determinada altitud porque tiene que reducirse hacia arriba (debido a la disminución de la densidad) y hacia abajo (debido a la disminución de la intensidad de la radiación). Esta capa «Chapman» varía también a lo largo del día.

En principio, debemos imaginar la situación del siguiente modo: en la zona comprendida entre 12 y 60 km de altitud el oxígeno molecular forma ozono en el proceso de la reacción de triple choque[20]. Por encima de esta zona ya no se forma ozono debido a la escasa probabilidad de que se produzcan choques triples con una menor densidad: allí domina el oxígeno atómico disociado. Por encima de la zona en la que se forma ozono pueden aparecer oxígeno molecular ionizado, O_2, y óxido de nitrógeno, NO^+ (región D). Estos, junto con el oxígeno atómico O^+, son responsables de la capa E. mientras que el oxígeno atómico ionizado y el nitrógeno molecular N_2^+ «hacen» la capa F_2.

La densidad de electrones alcanza en la zona de la capa D un valor de 10^3 por cm^3, y en la zona de la capa F se sitúa en 2×10^6 por cm^3. Es evidente que una capa con una densidad tan grande de electrones libres actúa como un reflector de las ondas electromagnéticas de no muy alta frecuencia (menos de 40 MHz) y, en consecuencia, refleja las ondas. La ionosfera desempeña un papel importante como «reflector» para conseguir una mayor distancia en la transmisión de informaciones. Por ello la investigación sobre esta capa ha estado vinculada a

[20] Proceso de choque en el que entran en colisión tres elementos al mismo tiempo.

los intereses de la radiodifusión (que en parte tenían también un carácter militar). Los radioaficionados que trabajan en onda corta (longitudes de onda entre 10 y 80 m) saben muy bien que la capacidad de reflexión de la ionosfera depende del momento del día, de la estación del año y, naturalmente, también de la actividad solar. Por ello, algunos países son especialmente adecuados para realizar una emisión radiofónica en determinadas horas del día. Una fulguración en el Sol suele estar acompañada de la emisión de rayos X, que determina en la ionosfera un aumento espontáneo de la densidad de electrones, una variación de la capacidad de absorción de las radioondas y una alteración de la conductividad. Este efecto fue observado antes de que se comprendiera su verdadera naturaleza (efecto Mögel-Dellinger). Los rasgos de la ionosfera constituyen una especie de tiempo meteorológico para la propagación de las ondas. Por ello, a la revisión de las características de la ionosfera se le denominó «pronóstico radiometeorológico». Con la autorización de frecuencias más altas, que pueden pasar por la ionosfera sin sufrir apenas influencia, ha perdido importancia práctica el conocimiento de las características de esta capa. El estudio de la ionosfera ya no constituye hoy una disciplina independiente, sino que conforma un aspecto parcial de la física de la atmósfera: por debajo de la tropopausa se denomina meteorología; por encima, aeronomía.

Muchos de los procesos más importantes de las capas altas y la ionosfera de la Tierra se pueden trasladar a las capas de gas de los demás planetas. Las capas de equilibrio fotoquímico, como las regiones D, E y F, existen también en Marte y Venus, e incluso en Júpiter, en cualquier lugar donde haya iones moleculares. Sin embargo, y debido a la gran estabilidad del CO_2, en Marte y en Venus no se encuentran estructuras comparables a la capa F_2. La Tierra y Venus tienen en común el hecho de que el paso de una atmósfera molecular a una estructura atómica se produce en la termosfera.

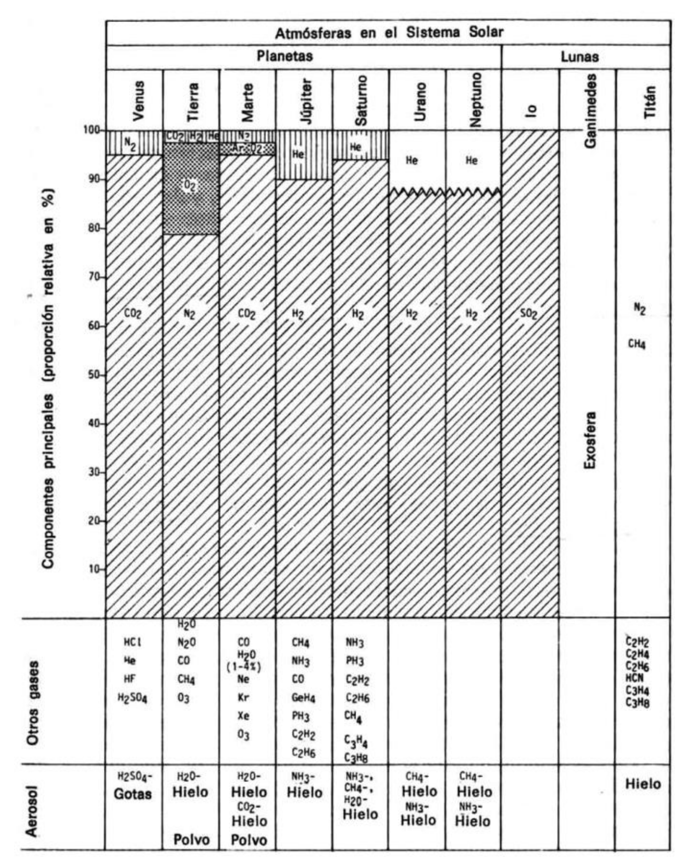


Fig. 12-4. La composición de las atmósferas de los planetas.

Cuando, como en la Tierra, no existe un campo magnético que proteja a la atmósfera de la influencia del viento solar, se produce —es el caso de Marte y Venus— un efecto directo sobre la ionosfera, cuyo límite (ionopausa) se encuentra entonces más cerca del planeta (por debajo de 500 km de altitud). La plasmapausa de la Tierra se encuentra a 4 radios terrestres de distancia. Los descubrimientos en parte sorprendentes realizados en la atmósfera de otros planetas —Mercurio y la Luna

prácticamente carecen de atmósfera— nos han permitido adquirir importantes conocimientos sobre ciertos procesos físicos que, a su vez, han hecho posible que comprendamos mejor las condiciones terrestres. La composición (v. fig. 12-4) de las atmósferas de los planetas constituye un dato muy importante para conocer la historia de la formación de éstos a partir de la nebulosa solar.

La atmósfera inferior de Venus se compone en un 95% de CO_2; el resto es en su mayoría nitrógeno molecular. Se encuentran también cantidades muy pequeñas de vapor de agua (50 ppm)[21], dióxido de azufre SO_2 (200 ppm), monóxido de carbono CO, oxígeno atómico y nitrógeno atómico, argón y neón. A partir de mediciones realizadas por las sondas soviéticas Venera 11 y 12 se conocen algunas composiciones de isótopos de los gases nobles neón y argón. Esto es importante, pues a partir de estas composiciones se pueden esbozar ciertas explicaciones sobre la formación de las correspondientes moléculas o átomos. Los isótopos ^{20}Ne, ^{36}Ar y ^{35}Ar son casi cien veces más frecuentes que en la Tierra. De ello se deduce que en la formación de los planetas la nebulosa solar mostraba una composición diferente en las zonas de Venus y la Tierra. En cambio, las frecuencias de N_2 y ^{40}Ar son similares a las terrestres, de tal forma que, si se considera asimismo el CO_2 de los sedimentos de nuestro planeta, también es igual la proporción de CO_2. No se comprende por qué en la atmósfera de Venus hay una cantidad de agua mil veces menor que en la terrestre. La atmósfera de Venus fue descubierta en 1761 por el ruso M V. Lomonosov.

La temperatura que en la superficie de venus es de 482°C, a 35 km de altitud alcanza todavía un valor de 160°C. En la superficie, la presión es de 91 bar y en la zona comprendida entre 35 y 49 km de altitud se extiende una capa de polvo de partículas de 1 µm (1 por cm^3). A mayor altitud aparece el sistema de nubes que cubre permanentemente el planeta, con densidades de hasta 100 partículas/cm^3. El principal componente

---

[21] ppm = «parts per million» = partes por millón.

de la capa superior de nubes está constituido por gotitas esféricas, probablemente de ácido sulfuroso, mientras que en la capa inferior se han encontrado partículas sólidas compuestas, posiblemente, de cloro, azufre y oxígeno.

En los intensos movimientos observados en las capas superiores de nubes, la existencia de aerosol en la atmósfera tiene que haber determinado procesos de carga electrostáticos y, en consecuencia, la aparición de rayos. Las sondas soviéticas Venera 11 y 12 han comprobado la existencia de estos rayos indirectamente a través de la radiación electromagnética formada en tales descargas. Pero los rayos no son más frecuentes en la atmósfera de Venus que en la de la Tierra. La capa de polvo de la atmósfera de Venus es tan densa en los polos que impide ver el sistema de nubes próximo al suelo. El aerosol estabiliza la temperatura del planeta en el elevado valor observado.

La alta temperatura de la superficie de Venus se debe al ya mencionado efecto de invernadero, provocado fundamentalmente por el anhídrido carbónico. La radiación solar determina un fuerte calentamiento de la superficie, que no puede emitir en infrarrojo, pues en estas longitudes de onda la atmósfera es opaca por debajo de 50 km de altitud. La mayor parte de la «ventana de radiación» se halla cubierta por CO_2, y el resto son moléculas de H_2O y SO_2 existentes en muy pequeñas cantidades (0,01-0,5%). Si Venus tuviera una atmósfera como la de la Tierra, la temperatura en su superficie se situaría en torno a 38°C a pesar de que su órbita recibe una cantidad considerablemente mayor de energía solar. La cara no iluminada de este planeta no es totalmente oscura, ya que recibe la llamada «luz cenicienta». Se trata de una luminosidad atmosférica que, similar a la terrestre, se conoce con el nombre de luminosidad nocturna o «airglow».

Hace tiempo que se conocen los movimientos turbulentos de la atmósfera de Venus; el aspecto mejor estudiado es la circulación zonal retrógrada (dirigida de este a oeste), de cuatro días de duración, de la atmósfera superior, en la que se alcanzan velocidades de hasta 100 m/s.

En la atmósfera de Venus encontramos dos sistemas de vientos diferentes. La «corriente en chorro» alcanza en el ecuador, a 65 km de altitud, velocidades de hasta 350 km/hora; a 50 km de altitud se han obtenido valores de 200 km/hora y a 20 km de 80 km/hora. A pesar de estas grandes velocidades, que hacen que una masa de aire tarde tan sólo 4 días en dar la vuelta al planeta, la espesa atmósfera de las proximidades de la superficie de Venus permanece casi inmóvil: hasta 10 km de altitud los vientos alcanzan velocidades máximas de 20 km por hora. Pero este sistema de vientos cambia lentamente. En 1974, por ejemplo, se formaron a 45 grados de latitud corrientes en chorro con una velocidad de 400 km/hora, mientras que en el ecuador la velocidad del viento era de «sólo» 360 km/hora.

A este sistema de vientos se une el llamado sistema de vientos meridional, que desplaza masas de gas caliente desde el ecuador hasta la región polar, alcanzando velocidades de hasta 25 km/hora.

La gran velocidad de los sistemas de vientos se debe a la transmisión de impulso de la atmósfera inferior, más densa.

La ausencia de un campo magnético determina que la ionopausa se encuentre a apenas 500 km de altitud. El perfil de la densidad de electrones de la ionosfera lleva a la formación de una «capa de Chapman» (v. pág. 252) a 140 km de altitud, con densidades de electrones de 10^5 por cm^3, los iones de CO_2 y O_2 parecen ser los más importantes. Del efecto del viento solar nos ocuparemos en el capítulo dedicado a las magnetosferas de los planetas.

El astrónomo W. Herschel sospechó por primera vez en 1784 que Marte tenía «atmósfera». Pero solo a partir de 1964 hemos sabido algo más al respecto, como, por ejemplo, que la atmósfera de Marte, al igual que la de Venus, está compuesta fundamentalmente de anhídrido carbónico (CO_2) (95%). La proporción de nitrógeno es de tan sólo un 2,7%, la de argón de un 1,6%, y el resto son otros gases, como nitrógeno, monóxido de carbono (CO), neón, xenón, criptón. El contenido en vapor de agua de la atmósfera varía considerablemente: en invierno se mantiene muy por debajo del 1%, mientras que en verano alcanza, en equilibrio con el hielo polar, valores más elevados.

Inmediatamente por encima de 250 km de altitud domina el nitrógeno como consecuencia del escalonamiento gravitacional; más allá abunda el oxígeno molecular ionizado. La ionosfera de Marte presenta un máximo en la densidad de electrones (capa de «Chapman»), con 10^5 electrones por cm^3, a 130 km de altitud. Siendo la densidad de electrones e iones comparable a la de Venus, se supone que en Marte la ionopausa (por efecto de la debilidad del campo magnético) se sitúa a 500 km de altitud, protegiendo a la atmósfera del viento solar.

El contenido en anhídrido carbónico de la atmósfera está controlado por los casquetes de hielo polares. La presión atmosférica es muy baja en la superficie y se sitúa en tan sólo 7 mb, a lo sumo 10 (en invierno). Los cambios de presión están provocados por la condensación y la sublimación de CO_2 en los polos y se calcula que el intercambio de CO_2 entre la atmósfera y los casquetes de hielo es de aproximadamente 7×10^{18} g.

Dado que en Marte no existe vida, el tiempo meteorológico está más influenciado por la estructura de la superficie que en la Tierra: también ejercen influencia sobre él la radiación superficial y el polvo agitado durante las ocasionales tormentas, que guardan una estrecha relación con el enturbiamiento de la atmósfera. Esto determina asimismo descensos considerables de la temperatura en la superficie (10 grados). Las temperaturas que reinan en la superficie oscilan, a lo largo del año marciano, entre 0 y –80°C, mientras que la temperatura media es de –60°C.

En la atmósfera marciana la ionosfera se encuentra a muy poca altitud: entre 110 y 150 km la densidad de electrones alcanza valores comparables a los que se dan en la capa F_2 de la Tierra a 300 km de la superficie. Pero la ionosfera de Marte es más bien del tipo de la capa F_1. La temperatura atmosférica oscila con el ciclo solar entre 200 y 400° K. Las proporciones de isótopos de los distintos elementos son parecidas a las existentes en la Tierra; las del nitrógeno con masas de 14 y 15 suponen únicamente el 60% de las proporciones terrestres. El nitrógeno de masa 14 pudo, al parecer, escapar del campo gravitatorio gracias a la energía liberada durante la fotodisociación,

de modo que la relación del escape más ligero en pequeños planetas es menor, mientras que el inventario inicial de ambos planetas permanece igual. Si se trasladan estas relaciones de frecuencias relativas terrestres, correspondientes al nitrógeno, argón, dióxido de carbono y agua, al planeta Marte, cabría esperar allí una densidad de columna de 200 g/cm^2 de dióxido de carbono y 1.000 g/cm^2 para el agua. Esta cantidad de agua debería haberse fijado en parte mediante oxidación del hierro, mediante liberación de hidrógeno, y/o en las regolitas situadas debajo de la superficie, en forma de un subsuelo helado de forma permanente.

Las atmósferas de los planetas exteriores se han podido conocer a través de observaciones espectrales del espectro de absorción y de emisión (se trata de mediciones extremadamente difíciles de realizar). Se utiliza, por un lado, la variación espectral de la luz solar reflejada por la atmósfera de los planetas, y por otro, la modificación de la luz de una estrella durante un eclipse estelar, cuando la luz de aquélla atraviesa la atmósfera del planeta justo por el borde de éste. A partir de ello se puede deducir la frecuencia relativa de distintos gases en una atmósfera. Los espectros de emisión proporcionan información sobre la estructura térmica del planeta y sobre su atmósfera (debido a las bajas temperaturas aquéllos se encuentran fundamentalmente en el infrarrojo lejano, esto es, a grandes longitudes de onda). Si resultó difícil encontrar los planetas exteriores, aún lo fue más estudiar sus características físicas. Las mediciones *in situ* realizadas por las sondas interplanetarias permitieron aclarar diversos puntos. Pero, como sucede con frecuencia, las nuevas certidumbres dan lugar a nuevas preguntas.

Las observaciones ópticas realizadas desde la Tierra están muy limitadas por las atmósferas de otros cuerpos celestes. Por ello se intenta superar las barreras impuestas por la opacidad de nuestra atmósfera montando telescopios en globos que alcanzan alturas de 40 km. De este modo se ha observado la cubierta de nubes de Júpiter y se ha descubierto que Saturno también posee su correspondiente cubierta. Las imágenes de Urano permitieron apreciar algunas estructuras, lo que no ha ocurrido en el caso de Neptuno. Con respecto a este último planeta se

sabe que tiene atmósfera porque su luminosidad apenas varía, fenómeno habitual en las atmósferas de los planetas en rotación (las superficies «desnudas» que no ponen de manifiesto una estructura homogénea muestran variaciones de la luminosidad con la rotación). Como sea que Plutón presenta variaciones semejantes de la luminosidad, es posible que también tenga atmósfera. Las variaciones se deben a la rotación, cuyo período es de 6,39 días.

Los cuatro grandes planetas exteriores han mantenido su composición original gracias a la fuerte atracción de la gravitación. La composición de sus atmósferas es similar a la del Sol, tal como se ha comprobado en Júpiter. La fotoquímica de estas atmósferas resulta ser más compleja que la de la Tierra debido a la existencia de un gran número de gases distintos entre sí.

Comencemos por Júpiter. En él resulta difícil establecer un límite entre «planeta» y «atmósfera»; es posible que el paso del estado fluido al gaseoso sea difuso. El hecho cierto es que las espesas nubes nos impiden ver las capas más profundas de la atmósfera. Con el concurso de métodos espectroscópicos se ha detectado la presencia de hidrógeno, metano, amoniaco, agua, fosgeno, germanio-hidrógeno, monóxido de carbono, acetileno y otros elementos. Desde los vuelos realizados por las sondas en las proximidades del planeta se sabe que también existe helio (cuya presencia no se detecta ópticamente). Para conseguir una escala de altitudes se elige arbitrariamente como superficie de referencia (altitud cero) la correspondiente a una presión de 20 barias (naturalmente, se trata de una superficie invisible). Allí la temperatura es de 400°K, y con la altitud desciende hasta alcanzar 100°K en la tropopausa, con una presión de 0,1 barias. En la estratosfera la temperatura vuelve a aumentar debido a la radiación solar, en la mesosfera se mantiene en 160°K y en la termosfera alcanza de nuevo valores muy elevados como consecuencia de la interacción con la magnetosfera.

En las fotografías de Júpiter *(lámina 3)* se observa, como estructura nubosa, un sistema de rayas claras y oscuras paralelas al ecuador. A las rayas más claras, amarillentas, se las de-

nomina «zonas», recibiendo las oscuras, de color marrón rojizo, el nombre de «bandas». Cinco zonas y cuatro bandas situadas en la región media del disco del planeta parecen formar una estructura atmosférica permanente que apenas se ha modificado con el paso del tiempo y que es menos regular en las regiones próximas a los polos. Las zonas claras presentan temperaturas más bajas, de donde se deduce que están a mayor altitud que las oscuras. Esto nos hace pensar que en las «zonas» asciende gas hacia arriba, mientras que en las «bandas» desciende. La estructura de las nubes permite suponer que en las latitudes altas se forman células de convección. A la hora de interpretar este hecho se ha señalado que en las células fluye gas ascendente en parte hacia el ecuador, en parte hacia el polo.

La fuerza de Coriolis (v. apéndice 6), muy intensa debido a la rápida rotación del planeta, integra esta corriente en una circulación este-oeste (del mismo modo que se forman los alisios en la Tierra). En el régimen de nubes correspondiente se han medido velocidades del viento de más de 100 km/hora. Esto aparte, en el límite entre zonas y bandas se forman corrientes en chorro, como consecuencia de las cuales aparecen también torbellinos.

Hoy se acepta por lo general que la «Gran Mancha Roja» (GMR), observada por vez primera por Cassini en 1665, es en realidad un ciclón, si bien de dimensiones gigantescas. La GMR se encuentra en la zona tropical meridional a unos 35° de latitud sur. Muestra un pequeño movimiento y su tamaño se mantiene invariable (22.000 × 11.000 km^2), mientras que su color cambia ocasionalmente (se hace más pálido). En los años 1888, 1912, 1916, 1938 y 1944 desapareció temporalmente. Sin embargo, antiguos dibujos de los planetas demuestran que la GMR existe desde hace al menos 400 años y que apenas se ha desplazado (Fig. 12-5). Dado que Júpiter no tiene una superficie sólida, esto es, carece de montañas, resulta fácil imaginar la existencia de un ciclón tropical o huracán (en la Tierra estos ciclones sólo pueden mantenerse durante mucho tiempo sobre superficies marítimas). En 1972 se formó un ciclón similar en el hemisferio norte. La *lámina 14* muestra una de las fotografías de la región de nubes, realizada por la sonda Voyager.

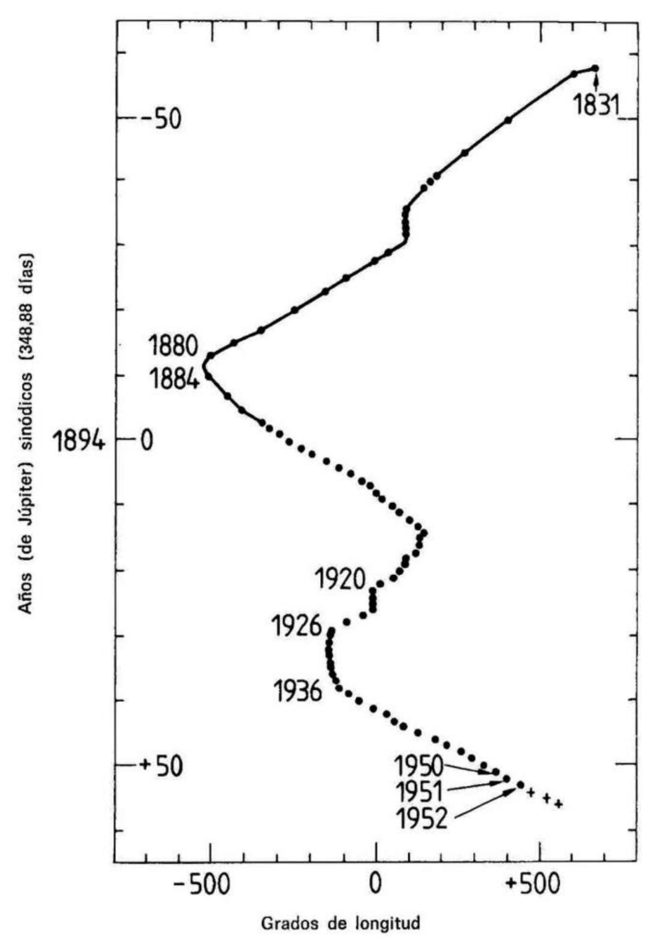


Fig. 12-5. El «desplazamiento» de la Gran Mancha Roja en la atmósfera de Júpiter.

Bajo esta turbulenta exhibición de colores se esconden tres capas de nubes. La capa superior podría estar constituida por amoníaco incoloro; el azufre y los compuestos del azufre darían color a la segunda, mientras que la tercera se formaría con hielo de agua. Los cumulonimbos de la atmósfera terrestre son

nubes de hielo de agua. Al caer en forma de lluvia, el agua determina la separación de las cargas eléctricas (como en las cascadas), de tal manera que las partículas y las gotas pequeñas se suelen cargar positivamente, por lo que ascienden con facilidad. Algo similar ocurre en la atmósfera de Júpiter: la separación de cargas determina la aparición de rayos, que, en buena lógica, deben observarse también en Júpiter.

En el Max Planck Institut de Lindau/Harz se construyó un instrumento capaz de registrar y analizar los rayos; fue lanzado a la atmósfera de Júpiter desde la sonda espacial «Galileo». La cámara de la sonda Voyager ha registrado iluminaciones momentáneas de las nubes que han sido interpretadas como rayos.

El polvo (aerosol) favorece la aparición de rayos en la atmósfera. La sonda Voyager ha descubierto en las capas altas de ésta un extenso velo de polvo que llegaba hasta el nivel de presión 3,5 mbar en la mesosfera (!).

El descubrimiento de la ionosfera de Júpiter con la sonda Pioneer 10 constituyó el primer paso hacia el estudio sistemático de la atmósfera superior de los planetas exteriores que se han realizado en los últimos años. La siguiente etapa en esta dirección fue la comprobación de la existencia de una ionosfera en la luna lo.

¿Cómo se puede formar una ionosfera? Dado que los planetas exteriores están tan alejados del Sol, las intensidades de la luz solar de onda corta no son suficientes para, por ejemplo, ionizar hidrógeno molecular, hidrógeno atómico o incluso helio en grandes cantidades (sólo pueden hacerlo los fotones del espectro solar cuya longitud de onda es respectivamente inferior a 80,4, 50,4 y 91,2 nanómetros). Esto nos lleva a la conclusión de que la fuente más probable de ionización es la «fotoionización disociativa» de hidrógeno molecular, esto es, su división en un átomo de hidrógeno y un protón. Por otra parte, se ha detectado la existencia de radiación ultravioleta liberada en este proceso. La frecuencia relativa de las moléculas en determinadas altitudes está condicionada por el peso molecular —las moléculas más pesadas predominan en las altitudes bajas—; por tanto, es de suponer que, al igual que en la ionosfera terrestre, según la concentración de constituyentes fácilmente

ionizables se formen diversos máximos relativos de densidad de electrones a diferentes altitudes. A la ionización contribuye también la radiación cósmica, que en los planetas exteriores tiene mayor importancia debido a la escasa intensidad de la luz solar. La estructura de las ionosferas de los planetas exteriores se ve también modificada por los iones expulsados de las superficies de las lunas de estos planetas como consecuencia de la acción de los iones ricos en energía del cinturón de radiación («sputtering»). La magnetosfera de Júpiter también está abastecida de iones por los volcanes de la luna Ío (el azufre es allí un ion dominante). Estos iones pesados, producidos en las capas profundas de la magnetosfera, pueden desplazarse hacia el interior por efecto de campos eléctricos variables en el tiempo y llegar, así, a la atmósfera del planeta. Al hacerlo ceden calor a ésta: se calcula que en Júpiter llegan de este modo a la atmósfera exterior varios ergios/cm^2 seg. Esta energía podría ser incluso superior a la que se produce en la atmósfera superior por la disipación de las ondas gravitatorias.

Ío tiene una ionosfera que a 100 km de altitud presenta una densidad de electrones de 6×10^4 electrones/cm^3, y se extiende hasta 750 km de altitud. La atmósfera de Ío se nutre de los gases lanzados a gran altura durante las erupciones volcánicas. La ionización es el resultado del bombardeo de esta atmósfera con las partículas cargadas que, muy energéticas, pueblan la magnetosfera de Júpiter. En la cara iluminada del satélite la densidad de la atmósfera es, en la superficie (se supone que se trata en su mayor parte de dióxido de azufre), de 10^{11}-10^{13} moléculas/cm^3. Los átomos y las moléculas de poco peso pueden escapar fácilmente debido a la escasa aceleración de la gravedad. Ello nos hace suponer que en la atmósfera predominan las moléculas ligeras.

Ganimedes también podría tener atmósfera: seria de naturaleza «exosférica», esto es, estaría en equilibrio difusivo con los gases que son absorbidos en la superficie. En tal caso hay que pensar que también existe una especie de ionosfera en torno a Ganimedes. Sigamos con las lunas: en el caso de Titán, la luna más grande de Saturno, hace mucho tiempo que se sabe

que posee «atmósfera»; G. Kuiper demostró por primera vez en 1944 que en este satélite había metano (v. tabla 12).

El peso molecular medio de la atmósfera de Titán es 28. Dado que no se ha encontrado monóxido de carbono, pero sí muchos indicios de la existencia de nitrógeno, es posible que el nitrógeno molecular sea el principal componente (v. fig. 12-4). La sonda Voyager ha identificado además las siguientes moléculas a través de la espectroscopia de infrarrojo (entre paréntesis aparecen las frecuencias relativas): metano (10^{-2}), etano (2×10^{-5}), acetileno (3×10^{-6}), etileno (10^{-6}), ácido cianhídrico (2×10^{-7}), así como propano y metiletileno y, presumiblemente, también argón.

La temperatura más baja de la atmósfera de Titán es de 70° K, situándose la temperatura media en 86° K. Se supone que los hidrocarburos proceden de la propia luna. Dado que Titán se mueve en la magnetosfera de Saturno, la atmósfera es bombardeada con electrones ricos en energía, de modo que se forman también iones de nitrógeno que pueden escapar de la magnetosfera de Saturno; además, de esta forma, se produce también ácido cianhídrico y otros productos de la fotoquímica del metano. La baja temperatura de 70°K actúa como trampa de frío para la mayoría de gases y limita su cantidad. Las nubes observadas cerca de la tropopausa (127 mbar, 71°K) no pueden ser gotitas de metano, debido a que las concentraciones (2%) están por debajo de la relación de saturación/mezcla. La polimerización de hidrocarburos podría dar lugar a la formación de aerosol, de modo que también se pueden formar gotas de líquido, que llueven sobre la superficie de la luna y hacen que aparezca en ella el océano de metano-etano cuya existencia se presume. En su órbita alrededor de Saturno, Titán pierde constantemente hidrógeno, posiblemente también nitrógeno, que toman la energía necesaria para ello de la energía de disociación. El gas se acumula en forma de toro, de 6 radios de Saturno de espesor, a lo largo de la órbita de Titán y a 20 R_S. La presión de la atmósfera alcanza en la superficie de Titán 1,6 bar, y la temperatura es de 93°K. La fracción de metano es en ella del 10%.

Titán también posee ionosfera y, dado que se puede mantener ocasionalmente fuera de la magnetosfera de Saturno, se supone que su atmósfera presenta estados muy diferentes. Titán no posee campo magnético; se formó en la zona relativamente fría de la nebulosa de acreción y puede haberse formado, por lo tanto, a partir de rocas y hielo, cuyos gases contribuyeron a la formación de la atmósfera. Dicha atmósfera sufrió una erosión menor que, por ejemplo, las lunas de Júpiter, debido a que el cinturón de radiación de Saturno tiene una intensidad menor. Sin embargo. Titán podría haber formado su atmósfera de nitrógeno a partir de nitrógeno procedente de la nebulosa de Saturno o mediante fotolisis del amoníaco en la fase de acreción. Sabemos con seguridad que Titán no posee un núcleo metálico.

Los estudios sobre Tritón apenas acaban de iniciarse, debido a que es ahora cuando disponemos de más información. La temperatura de su superficie y de su atmósfera es de 33°K. A causa de la fricción constante debida a los fenómenos de marea, se fraccionará en algún momento o también es posible que caiga, dentro de 10-100 millones de años, sobre la superficie del planeta Neptuno.

Saturno, Urano y Neptuno también tienen atmósfera. La temperatura efectiva de la superficie de Saturno es de 94,4 ±3º K. De ello se deduce que Saturno emite tres veces más radiación que la que recibe del Sol. Esto nos hace pensar que su atmósfera presenta una estructura muy similar a la de Júpiter. Predomina el hidrógeno, como se ha comprobado con la sonda Pioneer 11: el 85% de la atmósfera es hidrógeno. Sin embargo, hay algunos problemas por resolver; así, son seis los modelos diferentes de atmósfera que se han propuesto desde que se elaboró el primero en 1967. Las mediciones realizadas en el campo del infrarrojo hacen pensar que en la atmósfera está presente una capa inversora en la que la temperatura se sitúa en un nivel mínimo.

Esta capa —supuestamente idéntica a la tropopausa— influye sobre los procesos de intercambio entre las capas altas y bajas de la atmósfera. En la troposfera parece predominar el amoníaco, en tanto que en la atmósfera existe también una capa

de polvo —posiblemente cristales de amoníaco—. La atmósfera de Saturno contiene, además de hidrógeno y amoníaco, metano, etano, fosgeno, helio y otros elementos, mostrando, por consiguiente, una composición similar a la de la atmósfera de Júpiter. Dado que la presencia de helio no se puede detectar desde el suelo, esta conclusión tiene ante todo una importancia cosmogónica. Saturno presenta un color amarillento y es más luminoso que la mayoría de las estrellas —por lo que resulta fácil de localizar en el cielo—. Esto se debe a su albedo relativamente alto. Como su aceleración de la gravedad es menor que la de Júpiter y su temperatura más baja, una determinada zona térmica de su atmósfera soporta mayor presión que en Júpiter y, por tanto, se encuentra también más baja. La condensación del amoníaco, que en el último planeta mencionado determina la coloración llena de contrastes de las capas superiores de la atmósfera, se produce en Saturno en regiones más bajas, por lo que la visión desde el exterior no es tan buena. La escasa iluminación por el Sol determina que las fotografías del planeta enviadas por la sonda Voyager sean algo pálidas.

Observando con mayor detalle las fotografías *(lámina 15)* se descubren «zonas» y «bandas» como en Júpiter. Hay que suponer que en las zonas (de Hadley, más claras) asciende gas caliente, que éste se enfría y que tras formar cirros de amoníaco desciende a las bandas (más oscuras). En éstas se aprecian capas de nubes bajas. El movimiento del gas es ciclónico en las bandas y anticiclónico en las zonas. Si las grandes estructuras son más frecuentes que en Júpiter, no puede decirse lo mismo de las manchas, menos frecuentes y más pequeñas.

En las regiones ecuatoriales, los vientos alcanzan velocidades de hasta cuatro veces los valores registrados en Júpiter, extendiéndose hasta una latitud de ±40° (en Júpiter ±15°). En el ecuador, la corriente en chorro dirigida hacia el este alcanza velocidades de 480 m/s, dos terceras partes de la velocidad del sonido a temperaturas en torno a 100ºK. A 38° de latitud norte, una corriente dirigida hacia el oeste presenta velocidades de «tan sólo» 30 m/s (estas corrientes no tienen mucho que ver con la estructura de bandas). Mientras que en Júpiter la energía recibida del Sol es superior a la interna del planeta contenida

en la atmósfera, en Saturno ésta es dos veces mayor que la energía solar.

Al igual que en Júpiter, la tropopausa se encuentra en Saturno a una presión de 0,1 bar, pese a lo cual su atmósfera contiene menos polvo. Las reacciones químicas son más lentas que en Júpiter, por lo que se piensa que la atmósfera de Saturno es más homogénea. La existencia de aerosol se ha deducido a partir de la aparición de rayos, cuya presencia se descubrió a través de determinadas ondas electromagnéticas (Whistler) registradas por la sonda Voyager. Curiosamente, la atmósfera se extiende hasta más allá del sistema de anillos y es posible que éstos constituyan una fuente del hidrógeno exosférico encontrado en densidades de 600 átomos/cm^3.

Urano y Neptuno irradian también una mayor cantidad de energía que la que reciben del Sol (v. tabla 6-2), en contra de lo esperado. Mientras que la atmósfera de Urano está relativamente desestructurada, la de Neptuno está mucho más estructurada. Su «mancha oscura» (situada a 22° al sur) —una zona que abarca una longitud de 30.000 km— gira como la Mancha Roja de Júpiter en sentido antihorario, si bien más despacio que el fluido que se encuentra debajo de ella. (Los vientos soplan en la atmósfera de Urano del este al oeste con velocidades de hasta 300 m/s. Esto se verifica también en el caso de Urano [aprox. 200 m/s].) Por lo tanto, la atmósfera rota en las zonas más altas (por encima de los 20°) más despacio que el planeta. Urano recibe en los polos más energía que en el ecuador; a pesar de ello domina la rotación zonal simétrica respecto del eje de rotación. El dominio zonal es también característico para los otros planetas, si bien se ha considerado siempre una consecuencia del calentamiento de la atmósfera.

Las atmósferas de Neptuno y Urano están formadas en un 85% de hidrógeno, en un 13% de helio y en un 2% de metano, así como de trazas de etano. Al igual que todos los planetas exteriores, sus hemisferios iluminados por el Sol emiten también una débil emisión de la raya alfa de Lyman para el hidrógeno (Electroglow), que es, sin embargo, más débil que las emisiones de la aurora de ambos.

XIII. PARTÍCULAS CON CARGAS ELÉCTRICAS EN LOS CAMPOS MAGNÉTICOS: LAS MAGNETOSFERAS DE LOS PLANETAS

Antes de la era de los viajes espaciales se pensaba que, más allá de la atmósfera y de la ionosfera, en la «exosfera», continuaban disminuyendo la densidad del gas y la intensidad del campo magnético en la escasamente interesante amplitud del espacio interplanetario; un espacio en el que los planetas describen majestuosamente sus órbitas, por las de que de vez en cuando pasa un meteorito, luego un cometa...

Hace no muchos años que conocemos la existencia del viento solar, del que hablaremos con más detalle en el próximo capítulo. Pero no vamos a ignorar a los planetas. De ahí que nos preguntemos: ¿qué ocurre cuando un planeta constituye un obstáculo para el viento solar? Este último es una corriente de plasma que, compuesta fundamentalmente de hidrógeno ionizado (protones) y eléctricamente neutra (de modo que en densidades medias comparables los electrones rodean a los iones pesados), arrastra consigo al campo magnético solar.

Debido a la conductividad del plasma del viento solar nos parece que es importante el hecho de que un planeta tenga campo magnético o no. Así pues, tenemos dos tipos de regiones de interacción: el de Venus, Marte, la Luna (Titán) e Ío, por una parte, y el del resto de los planetas, por la otra. Porque, a pesar de que estos planetas y estas lunas no tienen un auténtico campo magnético planetario, el plasma que los rodea induce corrientes que crean campos magnéticos. En función de la conductividad del cuerpo, el plasma llegará a su superficie o fluirá a su alrededor. Sólo en el segundo caso se forma una especie de magnetosfera. Comencemos por el grupo de planetas y lunas con campo magnético y veamos el ejemplo de la magnetosfera terrestre.

En el vacío, el campo magnético de un planeta —campo dipolar— tendría la forma representada en la figura 10-2. La intensidad de un campo magnético de este tipo disminuye con la tercera potencia de la distancia del centro del planeta, y por consiguiente es muy débil en la parte exterior. Cualquier persona que haya manejado un pequeño imán habrá podido comprobar que hay que hacer un poco de fuerza para retirar un trozo de hierro de un campo magnético o para aproximar dos polos del mismo signo de, por ejemplo, dos imanes diferentes: se dice que en sentido transversal al campo magnético reina una presión ($B^2/8\pi$) que hace que los medios inmersos en el campo sólo se puedan acercar aplicando cierta energía. Imaginemos que en el espacio interplanetario «desconectamos» por un momento el viento solar, con lo que el campo magnético terrestre se comporta como el dipolo arriba mencionado. A continuación conectamos de nuevo el «viento»: las partículas con carga se mantienen en el campo magnético, y por ello se ven obligadas a seguir las líneas de campo en órbitas circulares. Tienen «impulso» (masa por velocidad) e intentan comprimir el campo magnético hacia dentro. Esto es posible hasta que la presión dinámica de las partículas (número de partículas por impulso por partícula) es igual a la presión (contraria) magnética del campo. La situación de equilibrio se altera con la presión del viento solar, pero se halla más próxima al planeta que las líneas de campo no deformadas, situándose a 10 radios terrestres en el punto subsolar de la magnetosfera de nuestro planeta. Así se denomina a la «cavidad» que el campo magnético crea en el viento solar (fig. 13-1). En la superficie de contacto entre las partículas del viento y el campo magnético fluyen corrientes impulsadas por las partículas eléctricas del propio viento. Así, en la parte interna de esta superficie —basándose en la terminología meteorológica la superficie recibe el nombre de «magnetopausa»—, se encuentra el campo dipolar de la Tierra, al margen del viento solar; en la parte externa está el campo magnético interplanetario, mientras que en la magnetopausa se manifiesta con brusquedad la transición entre ambas zonas. El campo dipolar se halla muy deformado en sus partes externas debido a las corrientes que fluyen en la magnetopausa.

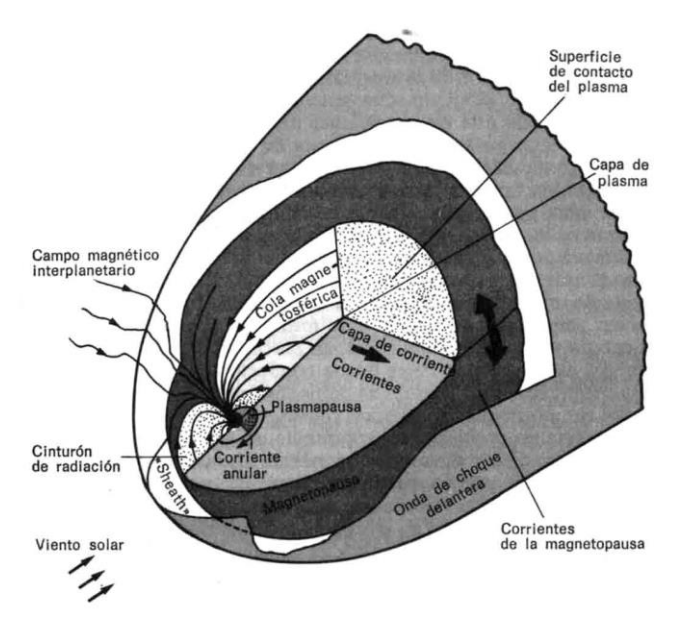


Fig. 13-1. La magnetosfera de la Tierra.

La magnetosfera actúa en la corriente del viento solar como un obstáculo elástico. La corriente tiene un carácter supersónico. Al igual que en la atmósfera, donde el movimiento supersónico está ligado a una onda de choque, delante de la magnetosfera se forma en analogía magnetohidrodinámica una «onda de choque permanente libre de choques», denominada «onda de choque delantera». Cuando se dice que está libre de choques quiere significarse que la formación de la onda no se debe a los choques entre átomos o iones, sino a la interacción electromagnética. Al pasar por esta onda, similar a un gigantesco paraboloide de revolución, el viento solar pierde su carácter supersónico y fluye a lo largo de la magnetopausa alrededor de la magnetosfera. Las ondas formadas por la desviación de la corriente en la capa intermedia situada entre la onda de choque y la magnetopausa se mueven en sentido contrario a la corriente y constituyen un obstáculo para la corriente de iones: de este modo se

forma la onda de choque, como resultado de la interacción entre las ondas que se mueven contra la corriente y la propia corriente. El plasma del viento solar y el campo magnético interplanetario se mueven juntos. Considerándolo desde la Tierra, un campo eléctrico determina esta situación. El denominado «campo de convección» es «perceptible» para la Tierra y está orientado de oeste a este, cruzando la magnetosfera. Aquí ocurre lo mismo que al observar una pintura al óleo desde lejos. Aunque se aprecian los contornos de lo representado, si nos acercamos al lienzo sólo vemos manchas de pintura; lo que antes parecía nítido se vuelve ahora difuso. Pues bien, otro tanto ocurre aquí. La magnetopausa presenta profundas inflexiones locales y, debido a las variaciones de presión del viento solar, se mueve de un lado para otro como si se tratara de ropa tendida en una cuerda. Con una geometría complicada, las corrientes superficiales evitan a veces las zonas en las que las líneas de fuerza magnéticas pueden pasar por la superficie de contacto. De cualquier modo, las partículas cargadas se pueden mover a lo largo de estas líneas de campo, con lo que es posible producir localmente un intercambio de partículas en el interior y en el exterior de la magnetosfera.

La variabilidad del viento solar origina algo parecido a un «tiempo» interplanetario que está en condiciones de ejercer una gran influencia sobre la magnetosfera terrestre. El interior de ésta se halla lleno de partículas con carga eléctrica que proporcionan a esta compleja estructura una vida propia tan complicada como interesante. Realicemos, pues, un breve viaje por la magnetosfera dé la Tierra.

Cruzamos la atmósfera y la ionosfera y apreciamos campos magnéticos provocados por sistemas de corrientes horizontales. Nos damos cuenta de que, aproximadamente al mediodía, la radiación ionizante aumenta de un modo considerable la conductividad de la ionosfera. La Tierra en rotación determina que se forme un sistema de corrientes cuyo campo magnético también resulta perceptible en la superficie terrestre. Así pues, la ionosfera es buena conductora de la electricidad; el campo magnético la atraviesa. Las corrientes eléctricas que fluyen a lo largo del campo magnético pueden cerrarse por encima de

la ionosfera, siendo éste un proceso muy importante en la zona de la luz polar. Fuera de la ionosfera el campo magnético de nuestro planeta sigue siendo todavía tan intenso que los distintos sistemas de corrientes no pueden alterar mucho su forma; en esta zona que, todavía próxima a la Tierra, recibe el nombre de «magnetosfera interior», el campo magnético tiene en gran medida un carácter dipolar. Si en un campo magnético las partículas con carga eléctrica son llevadas a una órbita en espiral alrededor del campo (fig. 13-2), en uno dipolar una partícula se mueve, una vez que ha pasado el mínimo del campo en el ecuador, a lo largo de una línea de fuerza en zonas con una creciente intensidad del campo (pues se acerca a la Tierra).

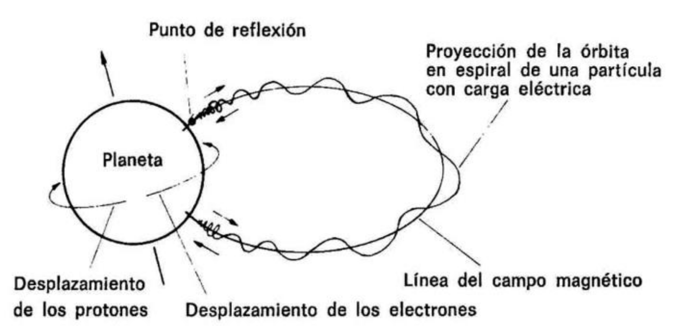


Fig. 13-2. El movimiento de las partículas con carga eléctrica en el campo magnético dipolar de la Tierra: el campo magnético obliga a las partículas a rodear las líneas de campo. Dado que su velocidad no es necesariamente perpendicular al campo, se mueven en órbitas en espiral. Al aproximarse a la Tierra el campo se estrecha y su intensidad aumenta. Como consecuencia de ello, la espiral se hace más plana y estrecha, hasta que el movimiento de las partículas se invierte a lo largo de la línea de campo. Se dice entonces que la partícula ha sido «reflejada». Con arreglo al mismo principio de la «botella magnética» se intenta, en experimentos de fusión, encerrar plasma en campos magnéticos y mantenerlo alejado de las paredes del recipiente.

Transcurrido cierto tiempo, esta configuración del campo se encarga de que la partícula no pueda penetrar más y de que se refleje como en un espejo magnético. La partícula en cuestión se mueve de un lado para otro en una línea de fuerza entre los puntos de reflexión meridional y septentrional, y está, por

consiguiente, «atrapada». Es en esta zona en donde se sitúa el cinturón de radiación, que en honor de su descubridor recibe el nombre de «cinturón de Van Allen». Tal configuración se parece, en principio, a la denominada «botella magnética» que se emplea en la física del plasma para encerrar a éste. Debido a la curvatura y a la intensidad dependiente del radio del campo, las partículas soportan además otras fuerzas que las obligan a desplazarse alrededor del globo. Así pues, una partícula describe una órbita, en la que permanece —sin considerar las desviaciones derivadas del carácter no ideal del campo—. La vida de una partícula cargada en el interior del cinturón de radiación puede prolongarse muchos años.

Los cinturones de radiación fueron descubiertos en 1957/1958 con los primeros satélites terrestres norteamericanos de tipo Explorer. Nada más descubrirlos se recordó que un ingeniero griego llamado N. C. Christofilos (que realizó importantes trabajos sobré el principio de la bomba de hidrógeno) ya había previsto este hecho. Siguiendo sus pronósticos, los días 27 y 30 de agosto y el 6 de septiembre de 1958 los Estados Unidos hicieron estallar tres bombas atómicas a 480 km de altitud (proyecto Argus). Los electrones producidos hicieron lo que se esperaba de ellos: se movieron a lo largo de las líneas de fuerza magnéticas y dieron lugar a fenómenos de luz polar. En 1962 se repitió el experimento en otro lugar con el proyecto «Starfish»: esta vez los electrones llenaron el cinturón de radiación interior. Lo inesperado fue que sólo cuando pasaron más de diez años (!) la «población» artificial disminuyó de nuevo hasta el punto de que a esta altitud decreció también la alteración de la radiación de los satélites. Durante el espacio de tiempo intermedio se interrumpió el estudio de la población natural de esa región porque no era posible diferenciarla de la artificial.

Pero, ¿cómo llegan a esa zona las partículas cargadas de forma natural? Existen varias posibilidades naturales. Los núcleos de átomos de la radiación cósmica chocan en la atmósfera con otros átomos. Dado que los núcleos implicados son muy ricos en energía, pueden salir neutrones de los núcleos de los átomos afectados. Los neutrones tienen una vida limitada antes

de desintegrarse en un protón y un electrón Mientras son neutrones, esto es, neutros, pueden expandirse sin limitación alguna, pero en cuanto se desintegran son atrapados de inmediato por el campo magnético. Los protones de las fulguraciones solares, ricos en energía, se hallan en condiciones de hacer otro tanto.

Del mismo modo, puede tratarse de protones de las zonas exteriores de la magnetosfera «camuflados» transitoriamente como átomos de hidrógeno neutros. Estos protones «toman» ocasionalmente un electrón de otra partícula y, de este modo, se neutralizan. Tras este «intercambio de carga» se mueven libremente por la magnetosfera hasta que son ionizados de nuevo de resultas, por ejemplo, de la intensa radiación alfa producida por la serie de Lyman del espectro del hidrógeno de la geocorona o de la luz solar ultravioleta. Así pueden llegar también a la parte interior del cinturón de radiación. Por último, las tempestades magnéticas «bombean» partículas cargadas de las zonas externas de la magnetosfera a las internas, con lo que las partículas ganan energía.

A una distancia de tres radios de la Tierra (fig. 13-1) cruzamos una «superficie» cuya existencia deducimos de la disminución repentina de la densidad del plasma en un factor cien. Junto al «cinturón de radiación de partículas ricas en energía», esta misma región de las líneas cerradas del campo dipolar está llena de plasma que sale de la ionosfera hacia la región interior conocida con el nombre de «plasmafera». Dado que en las capas altas de la atmósfera predomina el oxígeno atómico, no resulta sorprendente encontrar en la plasmafera, junto a hidrógeno y helio, una gran cantidad de iones de hidrógeno. Al límite exterior de la plasmafera lo denominamos «plasmapausa». La situación es distinta en las latitudes altas, pues el campo magnético ya no tiene allí un carácter dipolar. En las bajas, hasta el borde más próximo al ecuador de la zona de luz polar, sí existe, en cambio, la plasmafera. La plasmapausa presenta además la característica de que marca el límite de la «corotación»: más allá, el plasma se desplaza bajo la influencia de la fuerza centrífuga y de los campos eléctricos hacia la magne-

topausa en su parte de día, donde puede abandonar la magnetosfera. Dentro de la plasmapausa, por el contrario, el plasma gira con el campo magnético, pues el gas neutro que co-gira, por un lado, y la interacción similar a un rozamiento entre iones y electrones, por el otro, obligan al plasma a co-girar en la ionosfera. Este régimen desaparece allí donde predominan otras fuerzas: en esta región encontramos la plasmapausa. Si avanzamos más hacia el exterior en el lado de día, a una distancia de 10 radios de la Tierra llegamos a la magnetopausa. Esto no ocurre en el lado de noche: más allá de las líneas de campo que proceden de la zona de luz polar llegamos a zonas donde el campo magnético ya no es dipolar, sino abierto. En una representación «materializada» podemos imaginar la situación como una cabeza con una larga cabellera al viento. El cabello se mueve hacia atrás formando mechones que ondean más o menos paralelos en el viento: a esta región la denominamos cola magnetosférica. Dado que los campos magnéticos tienen una dirección, apreciamos que en la zona central entre la mitad norte y la mitad sur las líneas de fuerza muestran signos opuestos. La intensidad neta del campo magnético es allí cero; estamos en lo que se llama capa neutra. Está incluida en la capa de plasma, cuyo espesor varía entre 1 y 3 radios de la Tierra. En las proximidades de nuestro planeta esta capa se divide en dos brazos que desembocan sobre los casquetes polares meridional y septentrional. Allí se configura de nuevo el campo magnético: una corriente de plasma denominada «viento polar» conduce plasma ionosférico frío a la región de la cola.

En el meridiano de mediodía, a unos 60 grados de latitud (geomagnética), se forma en ambos hemisferios, en el lado de día, una zona en forma de embudo: en el borde de este embudo que se halla más próximo al ecuador las líneas de campo están cerradas, al tiempo que las demás son arrastradas hacia atrás por encima de los polos hacia la cola magnetosférica. A través del embudo puede llegar a la magnetosfera plasma del viento solar. Alrededor de la cola magnetosférica, que se extiende en el espacio hasta muchos cientos de radios terrestres de distancia y está rodeada por el viento solar, se forma una zona, denominada manto de plasma, de la que eventualmente se traslada

aún más plasma solar a la región de la cola En esta zona se acumula energía, que se «descarga» con intervalos irregulares: el resultado es una tempestad magnetosférica parcial, como consecuencia de la cual las partículas se aceleran hasta alcanzar energías muy altas. Al moverse fuera de la región de la cola en dirección a la Tierra, estas partículas llegan a la zona de luz polar. Así pues, la luz polar es la expresión visible de este proceso de transformación de energía alimentado por el viento solar.

Así pues, la magnetosfera es una región «ahuecada» por el campo magnético terrestre en el viento solar (y, por ello, inaccesible para las partículas de éste). Está «abierta» en una determinada parte, teniendo gran importancia procesos como la «fusión» de dos líneas de fuerza magnéticas que antes no estaban unidas, una surgida en la magnetosfera, la otra en el plasma del viento solar (es el denominado «merging» o «reconnection»).

Pero hay que tener cierto cuidado. Faraday introdujo el concepto de las líneas de campo, lo que permite ilustrar los campos y su efecto. Pero hay que procurar no malinterpretar esta idea de Faraday. Los campos sólo son perceptibles en relación con la materia sobre la que actúan. En el espacio interplanetario lo que podemos observar realmente es el plasma y el vector del campo magnético local. Por ello hoy se prefiere hablar de «tubos de flujo», esto es, de regiones del campo tubulares que contienen un determinado «flujo magnético» y en las que se encuentra plasma. Esta imagen tiene una relación definitiva con la materia y en consecuencia resulta más útil para representar los procesos de interacción.

Una vez que hemos analizado las condiciones terrestres, vamos a centrarnos en las de los demás planetas. Sus magnetosferas se han representado esquemáticamente en la figura 13-3.

Un estudio de Mercurio dejará ver la importancia de la rotación del planeta para la estructura de la magnetosfera. La escasa intensidad del campo magnético hace que se trate de una versión en miniatura de una magnetosfera. Dado que Mercurio no tiene atmósfera, y por tanto tampoco posee ionosfera, existen diferencias sustanciales. La intensidad del campo superficial es tan sólo 350 nanoteslas, esto es, menos del 1% del

campo ecuatorial de la Tierra. La magnetopausa se encuentra en el punto subsolar sólo a medio radio del planeta por encima de la superficie, donde se halla un frente de la corriente. En el lado de noche existe una cola magnetosférica, y en su interior una capa neutra. Pero es probable que las corrientes de la capa neutra y las de la magnetopausa sean tan fuertes en comparación con el campo planetario que no se pueda formar un cinturón de radiación. Tampoco debe existir una fuente interna de plasma, ni un campo eléctrico vinculado a la rotación, ni, por tanto, una plasmafera. Las descargas de energía similares a una tempestad parcial se producen con constantes temporales de algunos minutos (1-2 horas en la Tierra).

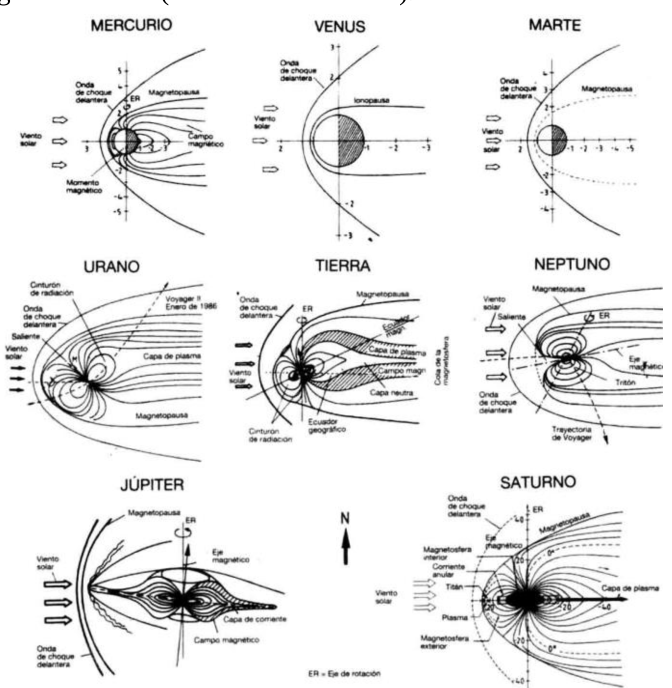


Fig. 13-3. Las magnetosferas del Sistema Solar (esquemas). En Venus y Marte se trata más bien de zonas que se han aislado del campo general a causa de la interacción entre el viento solar y el campo magnético interplanetario (v. texto).

Una menor intensidad del campo magnético permitiría al viento solar llegar a la superficie del planeta cuando la conductividad del cuerpo es reducida, con lo que sólo fluirán corrientes pequeñas. Por eso el viento solar puede llegar a la superficie de nuestra Luna, excepto en aquellos casos en los que ésta atraviesa la cola magnetosférica de la Tierra. En consecuencia, el satélite terrestre carece de magnetosfera. Venus, en cambio, sí posee atmósfera e ionosfera. Su conductividad permite a las corrientes inducidas crear un campo magnético tan extenso que el viento solar no pasa la ionopausa (a 500 km de altitud). En Marte ocurre algo similar, semejante por lo demás a lo que sucede en los cometas. Delante del obstáculo se puede formar un frente de choque en función de que las partículas del viento solar sean desviadas o absorbidas. La ionopausa se halla a 400 km de altitud, y dado que allí la presión atmosférica no resistiría a la del viento solar, los campos inducidos tienen que crear una presión magnética considerable. En la cara de noche, en cambio, se forma una zona de sombra similar a una región de cola. La magnetosfera de Júpiter presenta unas grandes dimensiones. Si luciera, sería para nosotros el mayor objeto del cielo; tiene casi 20 millones de kilómetros de diámetro, por lo que a nuestros ojos sería algo mayor que el disco del Sol. También es verdad que esta gigantesca burbuja varía mucho en función de la presión del viento solar.

Las lunas de Galileo de Júpiter se mueven dentro de esta inmensa magnetósfera, modificándola en una pequeña medida. Pero la rápida rotación del planeta determina una estructura muy diferente. Ello hace que se considere a la magnetosfera como «condicionada por la rotación», lo que la asemeja a los pulsares. En éste sentido, los modelos de la magnetosfera de Júpiter han servido de patrón para los modelos de los pulsares.

Las intensas fuerzas centrífugas cargan de plasma el campo magnético, principalmente en la región ecuatorial, con lo que el campo se estira en el plano ecuatorial. Como consecuencia, la magnetosfera presenta una estructura muy achatada. Al igual que en la cola magnetosférica de la Tierra, en regiones próximas encontramos campos magnéticos de signo opuesto, con capas neutras en los que pueden fluir corrientes.

Las sondas Voyager han aportado datos decisivos para el conocimiento de la constitución de la magnetosfera de Júpiter. 'Ésta presenta dos tipos de plasma, uno frío, más denso, que se queda a unos 17 radios de Júpiter tras la rotación del planeta y no aparece más allá de 40 R_J, y otro caliente que gira con el campo magnético del planeta hasta la magnetopausa. En contraposición a otras magnetosferas, el número de iones pesados (sobre todo helio, oxígeno, azufre) en el plasma es aproximadamente igual al de iones hidrógeno (protones) que predomina en el resto del Sistema Solar.

Tabla 13-1. Comparación de las magnetosferas de los planetas

Planeta	Onda de choque delantera	Magnetopausa	Plasmapausa/ Ionopausa
Mercurio	1,8	1,5	—
Venus	1,3	—	1,2
La Tierra	12	10	3
Marte	1,5	1,3	1,12
Júpiter	110	100	?
Saturno	20...25	20...24	10...15
Urano	23	18	?
Neptuno	–30	–20	?
Plutón	?	?	?

— Significa: no existe.
? Significa: no se conoce.
Distancias en radios del planeta, medidas desde el centro de éste, en el meridiano del mediodía.

Hasta 15 radios de Júpiter (R_J) domina el campo dipolar del planeta. Se encuentran allí partículas estables de alta energía, cuya intensidad aumenta fuertemente hacia el interior. Mientras se mueven a lo largo de las líneas de campo, los electrones con energías de millones de electronvoltios emiten la radiación sincrotrón descubierta desde la Tierra en 1955. Las lunas que se mueven en estas regiones absorben estas partículas, de modo que a lo largo de sus órbitas se halla disminuida la intensidad del flujo de partículas en determinadas zonas de energía. Esto coincide con otros hallazgos: la velocidad de Alfvén local, que en la física del plasma tiene la misma importancia que la del sonido en la hidrodinámica, es inferior a la velocidad relativa

de las lunas con respecto al plasma. Dado que no se ha comprobado que ninguna de las lunas tenga un campo magnético, la interacción con las partículas del cinturón de radiación es igual a la de la luna con el viento solar: en consecuencia, las partículas llegan a la superficie directamente, no son desviadas. Estas superficies podrían cargarse hasta potenciales que corresponden a la energía de los electrones del plasma, excepto cuando existe un plasma frío, denso, que se ocupa, por así decirlo, de la descarga. Amaltea, Ío, Europa, Ganimedes y Calisto se mueven en la magnetosfera de Júpiter e influyen sobre su estructura. Esto no sucede en las lunas exteriores, que, como la nuestra, se mueven en el espacio interplanetario.

En el caso de Ío existe además otro efecto (fig. 13-4): el período de revolución de ~42,5 horas, es mucho más largo que el de rotación de Júpiter (9,84 horas). Dada la distancia de la órbita de Ío con respecto al planeta, su campo magnético cogira de un modo fijo y existe un efecto de inducción previsto en 1957 por J. H. Piddington, en virtud leí cual se crea a través del satélite un alto potencial. Por ello, a lo largo de las líneas de fuerza de campo magnético de Júpiter fluyen corrientes que desde la ionosfera del planeta se dirigen a Ío y no se cierran ni por encima del interior de éste ni por encima de su ionosfera, con lo que las partículas se aceleran, A través de un complejo proceso del plasma, la interacción entre Ío y la ionosfera de Júpiter es más fuerte cuando el dipolo excéntrico del segundo está inclinado hacia Ío, siendo preferencial la parte norte. Este efecto se utiliza para explicar la estimulación, dependiente de la posición de Ío, de la emisión de radioondas con longitudes de onda de decímetros. Los volcanes del satélite configuran su atmósfera. La ionización es responsable de la existencia de un toroide de plasma alrededor de la órbita: si en su parte interna el toroide está nítidamente delimitado, en la externa se extiende hasta la magnetosfera de Júpiter. Esto hace posible que el azufre, elemento expulsado por los volcanes, se convierta en la magnetosfera en un ion dominante junto con el hidrógeno y el oxígeno.

Saturno es, al igual que Júpiter, una radiofuente intensa, pero no presenta ninguna radiación no térmica. El campo magnético es menos intenso y crea una magnetosfera que, medida en radios del planeta, corresponde aproximadamente a la de la Tierra, siendo en consecuencia mucho más pequeña que la de Júpiter (fig. 13-3). La onda de choque situada delante de la magnetosfera se encuentra a una distancia de 24 radios del planeta, y la magnetopausa a 22 radios. La magnetosfera de Saturno es similar a la de la Tierra, hasta el punto de que su tamaño y su forma están determinados por el equilibrio de la presión dinámica del viento solar y la del campo magnético. Así pues, no está tan «hinchada» como la de Júpiter. Por lo general se distinguen en ella cuatro partes con distintas características.

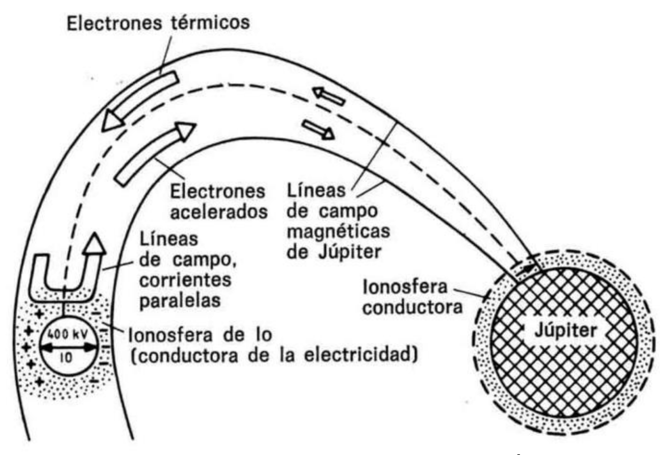


Fig. 13-4. Debido a la rápida rotación de Júpiter, la luna Ío está continuamente «adelantada» por el campo magnético del planeta. Como consecuencia del efecto de dinamo así producido se forma un campo magnético que atraviesa el satélite Gracias a la conductividad eléctrica de la luna fluye una corriente que se cierra sobre la ionosfera de Júpiter y que influye de un modo continuo en el régimen del plasma de la magnetosfera.

La magnetosfera exterior contiene un plasma que co-gira con Saturno, y cuya mayor densidad aparece a una distancia de 6 radios del planeta. En ella se han identificado, además de protones, iones de nitrógeno y oxígeno e iones hidroxilos (OH^-).

En contraposición a Júpiter, no se han encontrado iones H_3^-. Se supone que una parte «del plasma procede también del material de los anillos. Tal como se esperaba, se han hallado partículas «atrapadas» en el campo magnético Los flujos medidos varían en el tiempo, pero también lo hacen en relación con su distribución angular respecto al campo magnético. Al igual que en Júpiter, se ha encontrado una capa de corriente ecuatorial que rodea a Saturno a una distancia entre 8 y 16 radios, con un espesor de 4 radios saturnianos (perpendicular al plano ecuatorial), así como una capa de corriente en la cola magnetosférica. La región magnetosférica más próxima hacia el interior se caracteriza por una disminución del flujo de partículas como consecuencia de la absorción por las lunas Dione, Tetis y Encelado. Esta región se extiende hasta una distancia de entre 4 y 7,5 radios del planeta.

Dentro de esta zona y hasta los anillos vuelven a aumentar los flujos, apareciendo partículas de mayor energía: los espectros se hacen más duros, como en la Tierra y Júpiter. En la órbita de Mimas, a 3,1 radios, las partículas son absorbidas de nuevo con gran intensidad, de modo que vuelven a disminuir los flujos. En la zona de los anillos, la cuarta región, las partículas con cargas ricas en energía desaparecen casi por completo.

Así pues. Saturno se parece a la Tierra en la intensidad de su campo magnético y en su magnetosfera interior. La exterior, en cambio, se halla determinada por la rotación, como en Júpiter (capa de corriente). Pero la presión iónica es pequeña, por lo que probablemente no exista una corriente anular como en la Tierra. En contraposición a Júpiter, el hidrógeno predomina claramente sobre los iones pesados. Las lunas Mimas, Encélado, Tetis, Dione y Rea se mueven constantemente dentro de la magnetosfera de Saturno; Titán e Hiperión, por su parte, lo hacen a veces. Japeto y el resto de las lunas no penetran en la magnetosfera. En los casos en que los satélites se hallan dentro de una magnetosfera hay que esperar que se produzcan fenómenos ligados a estas lunas. En amplias zonas de su órbita, Titán se mueve en el interior de la magnetosfera de Saturno, in-

fluyendo, sin duda, en su estructura. Las observaciones realizadas han demostrado que esta luna «pierde» una nube de gas parecida a un toroide, cuyo diámetro es, en sentido perpendicular al plano de su órbita, de unos 2 radios de Saturno, mientras que en el plano de la órbita se extiende entre 7 y 23 radios del planeta. Esta nube, compuesta fundamentalmente de hidrógeno neutro, debería existir en teoría hasta que a lo largo de toda la órbita de Titán se pudiera formar un toroide cerrado. Su densidad alcanza el valor de 10 partículas/cm^3.

Entre la magnetosfera y la atmósfera de un planeta se produce un estrecho acoplamiento; en Saturno también existe luz polar. La zona de luz polar se sitúa a 80° de latitud, más cerca del polo que, por ejemplo, en la Tierra, donde se encuentra a ~70°. Todavía no se sabe con certeza si a través del «sputtering», esto es, de la expulsión de material de las partículas de polvo de los anillos por los iones ricos en energía presentes en la magnetósfera, llega a esta última material en cantidades notables, lo que podría determinar un aumento del número de ciertos iones pesados —del mismo modo que en Ío el volcanismo determina que el azufre sea uno de los iones más frecuentes en la magnetosfera de Júpiter—. Resulta interesante el hecho de que la proporción entre hidrógeno y helio arroja un valor muy elevado; dado que en el viento solar esta proporción es de aproximadamente 10 a 1, estamos ante un indicio de que una gran parte del hidrógeno ionizado procede de fuentes «internas».

Titán no se encuentra sólo dentro de la magnetosfera de Saturno: se halla parcialmente en la «magnetosheath», la región turbulenta, situada directamente delante, o incluso en el medio interplanetario, en contraposición a lo que se pensaba en un principio. Hay que tener en cuenta que esta luna sufre ocasionalmente la influencia del viento solar y que durante estos períodos debería mostrar una cierta similitud con Venus, donde la atmósfera también padece la influencia directa del viento solar. Cuando Titán se encuentra dentro de la magnetosfera (como sucedió durante el paso de la sonda Voyager), no se observa ninguna onda de choque, aun cuando en la magnetosfera

exterior el plasma co-gire con el planeta a unos 200 km/s. Debido a las corrientes inducidas, el campo magnético de Saturno se deforma en las proximidades de Titán hasta el punto de que envuelve a la luna como un pliegue de un vestido.

Por lo demás, Titán es una fuente importante del plasma que llena la magnetosfera exterior de Saturno, lo mismo que la luna Dione, que también parece estar relacionada con la emisión de radioondas por parte del planeta.

La proporción entre las masas Júpiter/Saturno/Urano es de 22,0 por 6,5/1,0. De ello se deduce que en el interior de Urano la presión es menor que en el interior de los otros dos planetas. Los valores de las densidades medias, en cambio, son de 1,33/0,7/1,31 g/cm^3, pudiendo observarse claramente que Urano no mantiene la proporción. Por consiguiente, tiene que ser muy diferente. El hecho de que el eje de rotación esté inclinado 98° con respecto a la perpendicular del plano de su órbita convierte a Urano en un objeto sumamente interesante, y aunque no existen pruebas directas de que tenga campo magnético, sí hay indicios de que así es. Si no tuviese campo magnético, ello no sería menos interesante debido a que, durante la formación de los planetas, hay que considerar una serie de procesos en una secuencia físicamente plausible, que en el caso de Urano debería haber conducido en realidad a la formación de un campo magnético.

Dado que, en función del punto de la órbita alrededor del Sol en que se encuentra el planeta, el eje de rotación se mueve aparentemente en relación con la estrella (unas veces señala hacia ésta, otras se halla perpendicular a la línea Sol-planeta), y dado que el momento magnético debería estar orientado aproximadamente a lo largo del eje, la magnetosfera no es estacionaria, sino extremadamente variable. Cuando el eje se muestra perpendicular a la línea Urano-Sol (fig. 13-3, abajo), las condiciones son similares a las de la Tierra: onda de choque, magnetopausa y cola magnetosférica, todo ello con un giro de 90°.

Pero si el eje señala hacia el Sol, el viento solar sopla de lleno en el polo. Sin embargo, cuando la sonda interplanetaria se aproximaba a Urano no se descubrió nada de esto, debido a

que, como se observó pronto, el eje del campo magnético está inclinado asombrosamente 60 grados respecto del eje de rotación. Esto sorprendió en un principio y desató las especulaciones. Al aproximarse a Neptuno, la sonda Voyager permitió descubrir que también su eje magnético está inclinado unos 47 grados respecto del eje de rotación. La sonda se aproximó al planeta prácticamente de la manera que se había esperado para Urano. Esta sorprendente semejanza de las condiciones magnéticas para ambos planetas no puede ser una casualidad, sino que debe de estar relacionada seguramente con el modo en que actúa la dinamo en el interior de ambos planetas. Esto, a su vez, debe de relacionarse con su estructura interna y su estado. Los momentos magnéticos de ambos planetas son muy parecidos entre sí: 2×10^{25} y $3{,}8 \times 10^{25}$ teslas × cm^3 para Neptuno o Urano, aunque el flujo de energía procedente del interior del planeta Neptuno es mucho mayor que el que procede de Urano. A este respecto se espera realizar investigaciones y obtener resultados muy interesantes en los próximos años.

Se supone que la estructura y la configuración de la magnetosfera de Urano y Neptuno son similares a las de la terrestre, utilizándose para los distintos parámetros las correspondientes transformaciones de la escala. Así, delante de la magnetosfera debería formarse una onda de choque estacionaria. La estructura interna está determinada también por el período de rotación del planeta, pues las fuerzas centrífugas son decisivas para el desarrollo de determinados procesos. Se supone, en el caso de Urano, que en la configuración en que el eje de rotación señala hacia el Sol existe una continua mezcla de líneas de campo entre los campos planetario e interplanetario. En este proceso magnetohidrodinámico la energía magnética se transforma en energía cinética de las partículas con carga, lo que equivale a una aceleración de dichas partículas. Se supone que en sentido transversal a la magnetosfera existe un campo de convección eléctrico de unos miles de voltios. La cola magnetosférica de Urano puede extenderse hasta muchos cientos de radios del planeta. A la distancia de 15-20° las zonas de las auroras boreales rodean los polos magnéticos; su emisión alcanza, en el

caso de Urano, los 9.000 Rayleigh, lo que equivale a una potencia emitida de 10^{10} vatios. La cola de la magnetosfera está dividida en dos partes como la de la Tierra, partes que tienen signos opuestos en cuanto a la intensidad del campo magnético. Allí donde ambas están próximas, el campo magnético desaparece y se forma una capa neutra, rellena con plasma, cuyo espesor alcanza los 10 radios planetarios (fig. 13-3). A una cierta distancia del planeta, la cola de la magnetosfera se orienta paralelamente respecto de la corriente del viento solar. Debido a la rotación del planeta, esta estructura es agitada con fuerza, dado que está ligada al eje magnético y no al eje de rotación.

Todas las lunas de Urano y todas las lunas de Neptuno, salvo Nereida, se mueven dentro de la magnetósfera. En un principio cabría esperar en la zona interior de la magnetósfera, correspondiendo con el campo dipolar magnético que actúa hacia abajo, la presencia de una zona de almacenamiento estable para partículas con carga eléctrica: es decir, un cinturón de radiación. A causa de la gran inclinación del eje magnético respecto del eje de rotación, las lunas rozan extensas zonas de latitudes magnéticas en las cuales son absorbidas las partículas cargadas, que en caso contrario poblarían el cinturón de radiación. Por este motivo se encuentran partículas muy energéticas únicamente en las zonas rozadas por las lunas. Las magnetosferas están «rellenas» con plasma igual que las demás magnetosferas. Existe una población «caliente» (energías de aproximadamente 10 *e*V) y una componente «muy caliente» supratérmica (50-100 *e*V).

El dipolo magnético «equivalente» está desplazado respecto del centro en ambos casos. Por ello varía notablemente la intensidad del campo magnético sobre una superficie concéntrica situada alrededor del planeta. La luna más cercana a Urano, o sea. Miranda, «nota» estas variaciones del campo magnético durante su órbita alrededor del planeta, de modo que en su interior se inducen corrientes eléctricas de gran intensidad que contribuyen a calentar este cuerpo.

El bombardeo de las lunas con partículas cargadas produce la liberación de material de la superficie (una especie de gases de emisión); estos átomos pueden llegar a la magnetósfera y

convertirse allí, después de su ionización, en parte del plasma, con lo cual la composición de éste estaría también determinada por el material de la luna.

XIV. LA HELIOSFERA: LA FÍSICA DEL PLASMA CÓSMICO

Denominamos «Sistema Solar» al conjunto de materia compuesto por el Sol, los planetas, sus lunas, los asteroides, los cometas, los meteoritos, el polvo y el gas, situada en uno de los brazos de la espiral de la Vía Láctea. Es el sistema en que nosotros vivimos y se formó hace 4.600 millones de años, manteniéndose desde entonces sin haber sufrido grandes transformaciones —dejando de lado una «breve» y turbulenta fase inicial—. Esta definición del sistema estacionario es incompleta, pues no considera un componente dinámico muy importante: el plasma del Sistema Solar va ligado al concepto de «heliosfera», que a su vez no toma en consideración los planetas por estimar que son anomalías locales. Esta concepción se manifestó por primera vez en la literatura a principios de los años setenta. Al describir la heliosfera se empieza, como es natural, por el Sol. Nosotros nos vamos a limitar al estudio de unos pocos aspectos, ocupándonos del viento solar y de sus características sobre todo a gran distancia del Sol, para llegar a la zona donde el viento no puede continuar fluyendo debido a las influencias procedentes del exterior.

Así pues, en nuestra exposición podemos imaginar que sólo existen el Sol y el plasma que fluye de él, que transporta el campo magnético solar hacia el exterior.

Pero dado que el Sol es una de las muchas estrellas de la Vía Láctea, muy alejada del centro galáctico, se supone que en las proximidades del Sistema Solar existe también un campo magnético galáctico, junto con polvo, gas neutro y, quizá, «viento galáctico». El Sistema Solar se mueve precisamente en este entorno galáctico.

Al igual que en las magnetosferas de los planetas, suponemos que existe un límite entre la región solar y el espacio interestelar; se trata de la heliosfera, definida como el espacio

natural donde queda limitado el campo magnético interplanetario.

La temperatura de la atmósfera solar alcanza en la corona valores de más de un millón de grados. En los años cincuenta, cuando se comprobó que estos valores térmicos eran correctos. S. Chapman elaboró una teoría en la que partía de la idea de un equilibrio hidrostático en la atmosfera solar De ello se dedujo una prolongación de la corona en el espacio interplanetario. Sin embargo, la teoría no contemplaba los bajos valores previstos en la densidad y la temperatura a gran distancia del Sol.

En aquel momento despertó gran interés una hipótesis de L. Biermann. Cuando se dio cuenta de que la cola de plasma de los cometas, que sigue una dirección radial opuesta al Sol, no se podía describir por medio de la presión de radiación del Sol, este investigador explicó el hecho como un efecto recíproco entre una corriente de iones continua y el material del cometa. Biermann otorgó a la densidad del flujo un valor de 10^{10} iones/cm^2 s. Los astrónomos alemanes A. Behr y H. Siedentopf ya habían apreciado a comienzos de los años cincuenta que la luz zodiacal, fenómeno luminoso visible en la eclíptica en los alrededores del Sol, está muy polarizada y que este hecho sólo se podía comprender si en estas zonas existían electrones libres en una concentración de 10^3 cm^{-3}. Todas estas ideas estaban en clara contraposición con la concepción hasta entonces generalizada, de un espacio interplanetario «vacío», en el que, en todo caso, «revoloteaban» algunas rocas. Combinando ambas observaciones se llegó a una velocidad de propagación del flujo de iones de Biermann de más de 100 km/s. Hacía mucho tiempo que se conocían ciertos indicios de procesos no estáticos en la región solar exterior Como ocurre en todo el Cosmos, los campos magnéticos están ligados a procesos dinámicos muy intensos: la materia se pone en movimiento y la energía se transforma en espacios de tiempo extremadamente cortos. Un ejemplo de ello son las erupciones cromosféricas del Sol, que hoy reciben el nombre de fulguraciones, y en las que la energía del campo magnético se transforma en pocos minutos en energía cinética de las partículas cargadas. Las manchas solares asociadas a los campos magnéticos aparecen

periódicamente en gran número y ya hace mucho tiempo que se conoce el ciclo de 11 años En la figura 3-3 se representa el «número relativo de manchas solares» como función del tiempo. Periódicamente, la actividad solar llega casi a cesar (y con ella también la frecuencia de las fulguraciones). A mediados del siglo XVII el Sol no mostró ninguna mancha solar durante casi 40 años (minimo de Maunder).

A partir de todo esto E. N. Parker llegó en 1958 a la conclusión de que la existencia de la corona solar sólo se podía entender dinámicamente. Solucionó el problema del modelo de Chapman situando a mayor distancia la igualdad con las condiciones galácticas. Esto no se puede explicar hidrostáticamente, pero sí dinámicamente. A partir de la idea de Biermann, Parker llegó a la genial conclusión de que la corona se expande continuamente. Comprobó que el efecto del campo gravitacional del Sol, la baja presión del medio interplanetario y la propagación esférica de la corriente debían determinar la existencia de una corriente supersónica de plasma en el espacio interplanetario, y la denominó «solar wind», viento solar. La corriente de energía que pasa del interior del Sol a la corona es de unos 10^{-2} julios/cm^{2}s; apenas 10^{-3} julios/cm^{2}s son irradiados por la corona, y $9{,}5\times10^{-3}$ julios por cm^{2}s son transportados por el viento solar hacia el exterior. Visto de este modo, el viento solar constituye el regulador que permite mantener relativamente constante la temperatura de la corona.

Las corrientes hidrodinámicas en expansión constituyen un problema astrofísico general. El plasma se expande de un modo similar en el halo galáctico, y se piensa que en las proximidades de los pulsares existen incluso vientos estelares con velocidades relativistas. La velocidad de expansión de la corona solar baja en las proximidades del Sol, pero aumenta con la altura. En el «radio crítico» (fig. 14-1) se equiparan la energía térmica y la energía cinética del plasma en expansión la velocidad es igual a la del sonido en el plasma. Más hacia el exterior la Comente adquiere un carácter supersónico. Este radio crítico no se conoce con mucha exactitud; podría situarse a una distancia de entre 15 y 30 radios del Sol. Más allá de 20 radios solares el viento solar apenas puede fluir libremente.

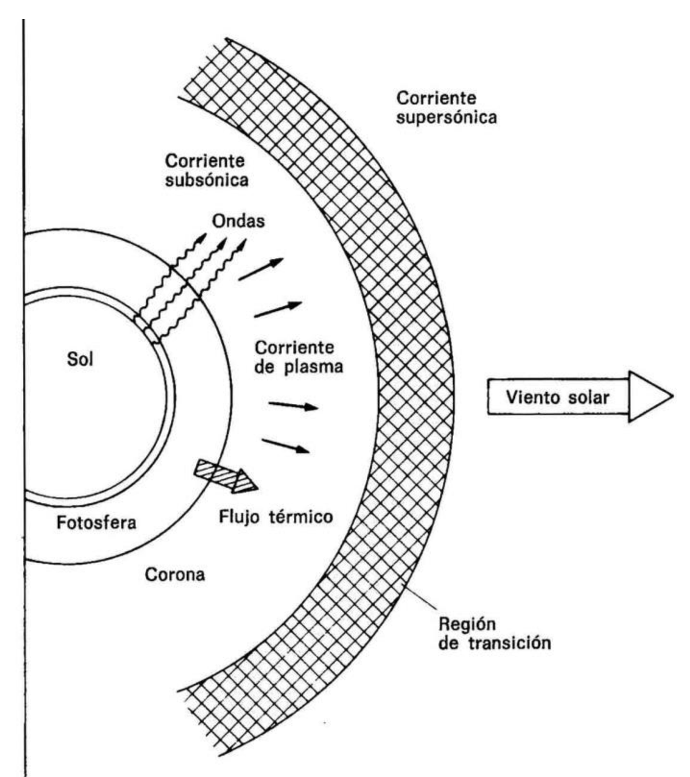


Fig. 14-1. A cierta distancia del Sol el viento solar adquiere un carácter «supersónico» en el «radio crítico» (a una distancia de 10-20 radios del Sol). Dentro de este radio el viento solar está impulsado por el gradiente térmico y es calentado por las ondas

Una pequeña aberración (v. apéndice 1) se debe al impulso de giro que ha tomado al desprenderse de la atmósfera en corotación del Sol Aunque el campo magnético solar impide que el viento pueda expandirse a velocidades inferiores a 100 km/s, el calentamiento de la corona determina la existencia de ese viento, velocidades que se sitúan necesariamente por encima de 100 km/s. Debido a la elevada densidad de la energía cinética del plasma, el campo magnético solar es arrastrado hacia fuera con el viento, pero permanece ligado al Sol. En la zona

de co-rotación tiene una estructura radial fuera de ella el campo magnético interplanetario solar forma una especie de espiral de Arquímedes (fig. 14-2). Este efecto es similar al «efecto de Rasensprenger» en el que las líneas de corriente forman una espiral de Arquímedes, mientras que las gotas de agua escapan en dirección radial Estas gotas equivalen al plasma, y las líneas de corriente al campo magnético. El campo magnético interplanetario responde a la fórmula

$$r = V/\Omega\ (\Phi - \Phi_0)$$

siendo V la velocidad del viento solar. Ω la velocidad angular del Sol, r la distancia y $\Phi - \Phi_0$ la distancia angular entre un punto del Sol y una longitud de referencia. Cuanto más se avanza hacia el exterior, más se aproxima esta espiral a un círculo. Fuera del plano de la eclíptica el campo describe superficies cónicas hacia el exterior. En el centro, el viento solar es eléctricamente neutro y el número de partículas con carga positiva resulta ser igual al de partículas con carga negativa en un volumen no muy pequeño. La situación puede ser distinta localmente (esto es. en pequeña escala), existiendo entre las zonas con una carga dominante campos eléctricos que tienden a equilibrar las diferencias. Estos campos tienen todas las direcciones posibles y pueden presentarse durante períodos de tiempo de distinta duración; en otras palabras, en el viento solar hay campos electrostáticos turbulentos y ondas electrostáticas que se propagan. Pero hay también algo más: ondas electromagnéticas, magnéticas y acústicas Las ondas están ligadas a un transporte y un intercambio de energía y a una aceleración de las partículas cargadas.

El viento solar fue medido directamente por primera vez durante el vuelo de la sonda espacial soviética Lunik II, en septiembre de 1959, por Gringauz y sus colaboradores. Estas observaciones fueron completadas con las de otras sondas soviéticas (Lunik III y Venus I). Las primeras mediciones dieron un resultado de una densidad de la corriente de protones de 10^8-10^9 cm^{-2} s^{-1}, lo que coincidía con la previsión teórica de una corriente supérsonica, si bien no constituía una prueba directa

de la existencia de una corriente orientada en una sola dirección. La primera medición exacta realizada por científicos norteamericanos la obtuvo, en el año 1961, un grupo de trabajo del Massachusetts Institute of Technology (MIT), de Boston, con el satélite Explorer 10; se estimó para la velocidad un valor de ~300 km/seg y una temperatura de los protones entre 10^5 y 10^6.

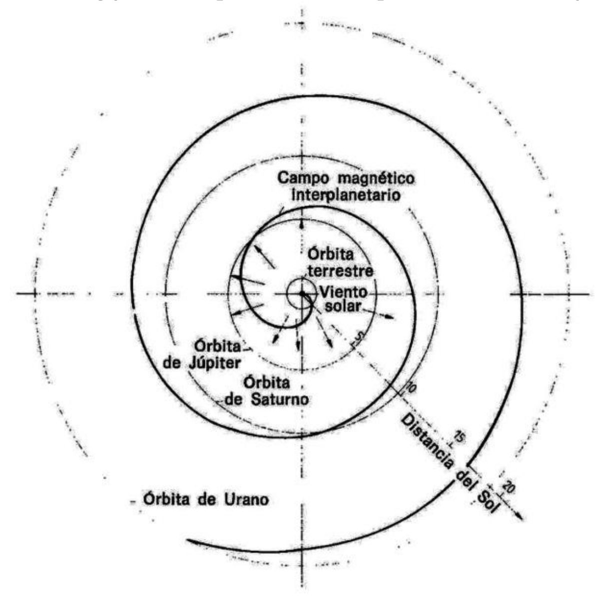


Fig. 14-2. El «campo magnético interplanetary» tiene su origen en el Sol. Debido a la elevada conductividad eléctrica del plasma del viento solar, el campo magnético solar contenido en un determinado elemento de volumen en las proximidades del Sol es arrastrado en sentido radial hacia el exterior con este elemento de volumen. Gráficamente lo podemos imaginar como si el campo magnético se retirara del elemento siguiente («occidental») en el sentido de rotación del Sol y fuera «traspasado» al elemento anterior en el sentido de rotación. Mientras el elemento anterior se halla más hacia el exterior y el siguiente más hacia el interior, se forma un campo magnético inclinado con respecto al radio. En términos más precisos, se extiende en forma de una espiral de Arquímedes hacia el exterior. Las fluctuaciones del viento solar se transmiten directamente al campo, de modo que la estructura representada tiene un carácter medio. Localmente y en intervalos de tiempo cortos el campo puede desviarse notablemente de la situación media.

La primera medición extensiva de las características del viento solar durante un espacio de tiempo prolongado se realizó con la sonda norteamericana Mariner II en 1962-1963. Estas mediciones permitieron conocer por primera vez la fuerte variabilidad del viento solar. En la figura 14-3 se muestra la variación de la velocidad del viento durante vanos períodos de rotación solar Se ha representado la velocidad del viento solar en función del tiempo Dado que la longitud de una línea equivale a un período de rotación del Sol, en la serie de líneas consecutivas se aprecia la persistencia de ciertas características de la comente a lo largo de varias rotaciones solares Las mediciones se realizaron con los instrumentos del Max Planck Institut für Aeronomie de Lindau instalados en la sonda espacial germano-norteamericana «Helios». La composición del viento solar coincide, tal como se esperaba, con la de las capas exteriores del Sol.

En nuestra estrella existen zonas cuya temperatura y densidad son especialmente bajas; de ellas proceden campos magnéticos abiertos, unipolares, y un viento solar muy veloz (V > 400 km/seg). Estas zonas se denominan agujeros coronarios. El hecho fue apreciado por vez primera en 1957 por el astrónomo suizo M. Waldmeier, quien también hizo referencia a su tendencia a repetirse cada 27 días y a su posible relación con las tempestades geomagnéticas que se repiten cada 27 días —postuladas en 1934 por el geofísico de Gotinga J. Bartels— y con los hipotéticos «centros M». Pero sólo los estudios realizados con el «Orbiting Solar Observatory», el satélite OSO de la NASA, y el «Skylab», permitieron obtener datos definitivos. En, 1973, estas mediciones demostraron la relación directa existente entre los agujeros coronarios y las corrientes de alta velocidad del viento solar. Con ello se probó que en las proximidades del ecuador solar los agujeros coronarios son idénticos a los «centros M» de Bartels, que en los períodos de máxima actividad solar son escasos y que no duran mucho tiempo. En la figura 14-3 se representa este hecho: el viento solar rápido no es frecuente en los períodos de alta actividad solar. En cambio, con una baja actividad se encuentran sobre los polos del

Sol extensos y estables agujeros coronarios de polaridad magnética opuesta, en lo que constituye una manifestación del campo magnético dipolar del Sol.

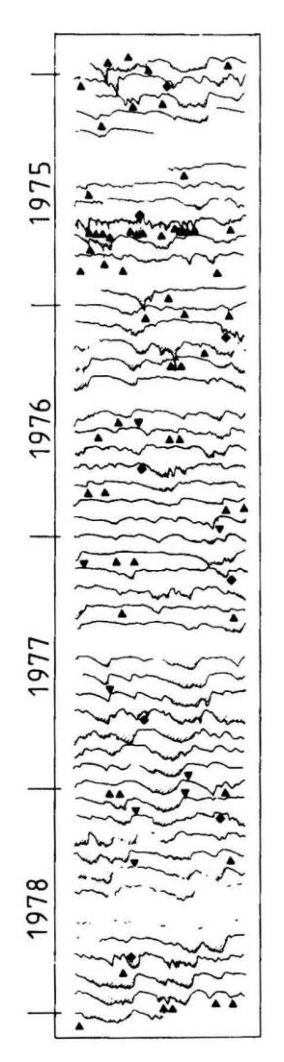


Fig. 14-3. Las velocidades del viento solar, medidas con la sonda espacial Helios 1 entre 1974 y 1978 en el espacio interplanetario, prácticamente en el plano de la eclíptica. Las zonas sombreadas indican velocidades superiores a 500 km/s. Las velocidades más bajas se sitúan en torno a 200 km/seg. Los puntos indican el momento en que Helios se encontraba en el perihelio (0,3 UA). Cada línea horizontal abarca 27 días (una rotación solar) y las curvas representadas unas debajo de otras corresponden a rotaciones solares consecutivas (esto es, cada una a un «día solar»).

En los períodos de alta actividad solar este campo es deformado por intensos campos magnéticos locales en la zona de las manchas solares. A mayor distancia domina siempre una bipolaridad del campo magnético. Las líneas de éste, casi abiertas, de los agujeros coronarios polares son compensadas o. dicho de un modo más expresivo, separadas, por una capa de corriente en una superficie magnéticamente neutra (fig. 14-4). En los períodos de mínima actividad solar los agujeros coronarios pueden extenderse desde las zonas polares hasta el ecuador. Del mismo modo, la capa de corriente transcurre eventualmente en una superficie muy irregularmente ondulada.

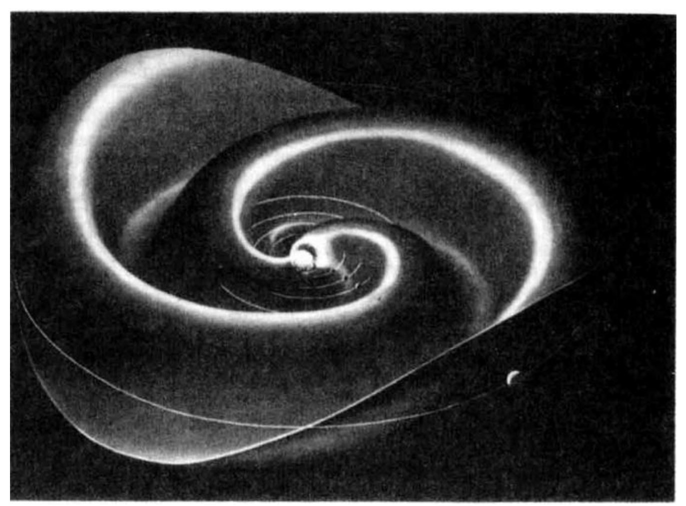


Fig. 14-4. Representación esquemática de la capa de corriente en el Sistema Solar. La órbita terrestre puede situarse por encima o por debajo de ella Si el campo magnético solar (interplanetario) que transcurre al norte de la capa está orientado hacia el exterior, el campo que transcurre por debajo se orientara hacia el interior Por consiguiente, una sonda espacial observa el campo dirigido hacia el interior o hacia el exterior en función del lado de la capa de corriente en que se encuentre.

Un observador situado en la eclíptica vería alternativamente su cara superior y su cara inferior, esto es, apreciaría la polaridad del campo magnético interplanetario dirigida hacia

dentro y hacia fuera. La figura 14-4 ofrece un esquema de una situación de este tipo. Así se explica hoy la durante tanto tiempo enigmática «estructura sectorial» del campo magnético interplanetario (fig. 14-5) que aprecia un observador en la eclíptica.

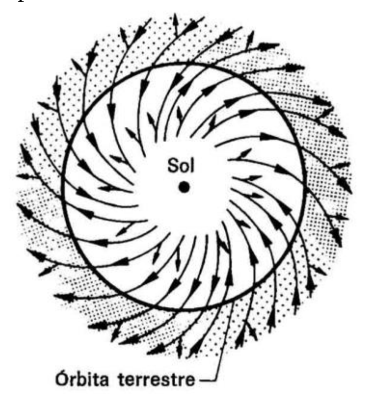


Fig. 14-5. La «estructura sectorial» del campo magnético interplanetario. El campo magnético se observa dirigido hacia el interior o hacia el exterior en función del lado de la capa de corriente desde donde se observe.

El viento solar fluye en sentido radial hacia el exterior hasta que se lo impiden las fuerzas externas. Para saber de qué tipo son estas fuerzas y cómo es la región límite debemos tener una idea acerca de la naturaleza del entorno del Sistema Solar. El Sol se encuentra en uno de los brazos de la espiral de la Vía Láctea, relativamente distante del centro galáctico. Allí se produce una gran acumulación de estrellas que generan un viento estelar similar al viento solar. Suponemos que en el espacio interestelar hay campos magnéticos arrastrados hacia el espacio exterior con el viento solar. Asimismo, existe plasma cuya densidad de electrones podemos fijar, basándonos en diversas mediciones, en 0,05 electrones/cm^3, con una temperatura que no debe ser superior a 10^4 °K y con un campo magnético[22] supuestamente «congelado» que presenta intensidades en tomo a 0,35

[22] Cuando el plasma y el campo magnético no se mueven en sentido opuesto es lo que ocurre en los casos en los que la densidad de energía del plasma en movimiento es muy superior a la del campo magnético Éste es «arrastrado»

nanoteslas. Esto aparte, en el espacio interestelar se ha podido verificar la existencia de polvo y gas neutro, principalmente hidrógeno y helio. A partir de observaciones fotométricas de la radiación a de la serie de Lyman del espectro del hidrógeno sabemos que el gas neutro se traslada, en relación con el Sistema Solar, a una velocidad de ~20 km/s.

El plasma y el gas neutro se mueven debido a los choques ocasionales entre ambos grupos de partículas, por lo que la velocidad con respecto al plasma presenta el mismo valor.

El gas neutro puede penetrar sin dificultad en las estructuras del Sistema Solar determinadas por el campo magnético y el viento solar. Existen dos «lectora través de los cuales el plasma y el gas neutro intercambian energía: la ionización v el intercambio de carga. El primer efecto es más probable cuanto más se acerca al Sol una partícula neutra. En el momento de la ionización la partícula ya cargada experimenta una aceleración que se transmite a través del campo magnético llevado hacia fuera: en el momento de la ionización la partícula ya cargada comienza a moverse alrededor del campo magnético. Si el campo se traslada bajo un ángulo distinto a cero en dirección opuesta a la del movimiento de la partícula, éste alcanzará la velocidad del plasma tras unos pocos períodos de revolución. De este modo se forman en alguna parte del Sistema Solar partículas con carga que son llevadas de nuevo hacia afuera con el viento solar y que pueden ser aceleradas de diversos modos (p. ej., por ondas de choque), pero que debido a su mayor «rigidez magnética» (impulso por carga) pueden difundirse de nuevo en el interior del Sistema. Los átomos que precisan una gran energía para ionizarse —es el caso de los gases nobles helio o neón— penetran a veces profundamente en el Sistema Solar, y eventualmente presentan una mayor aceleración. Al realizar mediciones de la radiación cósmica se ha detectado en estos elementos una anomalía de las frecuencias relativas en energías situadas entre 20 y 100 M*e*V por núcleo. Se supone que este

por el plasma, fenómeno habitual en los plasmas cósmicos debido a la relativamente alta conductividad eléctrica de éstos.

«componente anómalo» no se puede atribuir a la radiación procedente del Cosmos, sino que ha surgido del gas interestelar neutro original a través del proceso descrito.

El intercambio de carga entre un átomo de hidrógeno neutro (frío) lento y un protón del viento solar («caliente») determina una transformación directa de las características del viento: se forman un protón del viento solar «frío» y un átomo de hidrógeno neutro rápido, que ya no necesita preocuparse por el campo magnético. Si esto ocurre en la zona del viento solar supersónico, el átomo de hidrógeno neutro escapa del Sol a la velocidad del viento solar. Debemos esperar como consecuencia directa un gas neutro rápido que escapa del Sistema Solar. Sin embargo, además de su energía de flujo, el nuevo protón del viento solar tiene ahora «energía térmica», que equivale a su velocidad original como partícula neutra de aproximadamente 20 km/s, manifiestamente superior a la característica de los «viejos» iones del viento. Por consiguiente, el intercambio de carga y la fotoionización determinan una pérdida de energía de flujo del viento solar y un aumento de la energía térmica, lo que supone un retardamiento y un calentamiento de la corriente. Por otra parte, en la región de la corriente supersónica predomina el calentamiento del plasma.

En las regiones exteriores del Sistema Solar disminuye la presión dinámica del gas del viento. Este último, cuyo campo magnético arrastrado es más allá prácticamente perpendicular a la dirección de la corriente (fig. 14-2), se encuentra ahora con el plasma interestelar. Si su presión dinámica alcanza el valor de la presión global del gas interestelar, el viento solar, al igual que ocurre cuando choca con el campo magnético terrestre, tiene que liberarse del carácter supersónico de su corriente mediante una transición de ondas de choque. Detrás de esta onda de choque el viento sigue difundiéndose como una corriente subsónica. Debido al plasma interestelar que fluye hacia esta región, en esta zona de transición se invierte la dirección de la corriente del viento y el «cuerpo» así formado en la dirección del viento estelar se rodea con una simetría axial. Con ello se obtiene la configuración que se ha esquematizado en la figura

14-6. A la zona en la que, como se ha descrito, quedan limitados el viento solar y el campo magnético interplanetario la denominamos «heliosfera». A partir del plasma que fluye, a su alrededor se desarrolla una especie de cola, la cola heliosférica. El tamaño de la heliosfera es muy variable, y no por causa de la actividad solar —el efecto no sería dramático—, sino de las características (densidad del gas) del espacio interestelar.

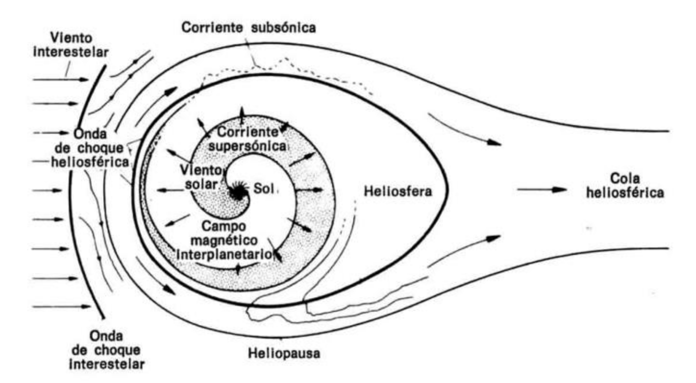


Fig. 14-6. Esquema de la heliosfera. Perfil en el plano de la eclíptica. «Des- plegado» por el viento solar vemos en la heliopausa el límite entre el campo magnético heliosférico y el campo interestelar. Se aprecia como una zona que cubre en el Sol casi 180° de longitud a gran distancia y se convierte en una estructura muy delgada en sentido radial debido a la dirección casi acimutal del campo magnético. En el texto se incluyen más detalles.

A partir del balance entre la presión dinámica del viento solar tras la onda de choque, por un lado, y la presión ejercida en sentido contrario por el medio interestelar, por otro, se puede deducir la distancia de esta región con respecto al Sol. La onda de choque debe situarse a una distancia entre 50 y 100 UA.

La interacción con el gas neutro interestelar a través del intercambio de carga contribuye también a la desviación del viento solar tras la onda de choque. En contraposición a la interacción, antes comentada, con la corriente supersónica del viento solar, en la turbulenta zona subsónica del viento solar

desviado —cuyos iones encuentran por fin su dirección de flujo en órbitas a veces muy sinuosas— se produce una emisión de gas neutro producido en el intercambio de carga prácticamente en todas direcciones, esto es, también hacia el interior de la heliosfera. La velocidad de este gas se sitúa en tomo a 100 km/s y es superior a la del gas que llega directamente del espacio interestelar con velocidades relativas de unos 20 km/s. Este gas, y en especial la componente más rápida, continúa calentando y retardando el viento en la parte externa de la heliosfera. Nos encontramos, pues, ante un complejo proceso de interacción a través del cual la densidad del gas neutro interestelar influye continuamente en la configuración, las dimensiones y las características de la heliosfera. Una densidad elevada puede determinar que la transición a la corriente subsónica no se produzca en una onda de choque, sino de modo continuo. Por otra parte, con los actuales parámetros del entorno no es probable que se forme una onda de choque en el medio interestelar delante de la heliosfera. Esto sí es posible, en cambio, en zonas con otra densidad del gas neutro. Dado que en su camino por la Vía Láctea el Sistema Solar se mueve por regiones de diferente densidad, no pensamos que exista una heliosfera constante desde el punto de vista temporal. En la actualidad nos movemos por un «agujero», esto es, por una región en la que el gas presenta una densidad muy baja.

El campo magnético interplanetario, prácticamente circular, define también una limitación magnética que lo separa del campo galáctico. Este límite se denomina, en analogía con los conceptos de magnetósfera terrestre, «heliopausa».

Suponemos que la anterior descripción de la heliosfera en las proximidades del plano de la eclíptica se acerca mucho a la realidad. Las dimensiones derivadas de la teoría del plasma coinciden con las que se han estimado en otros ámbitos. La sonda espacial norteamericana Pioneer 10, que ha alcanzado las órbitas de los planetas exteriores (~25 UA), ha confirmado que allí la estructura del campo magnético es prácticamente circular.

Los tiempos de propagación de las partículas solares ricas en energía a lo largo de estas líneas de campo confirman también el origen de los campos en el Sol (en contraposición con la idea de las «burbujas magnéticas» desprendidas). Hasta el momento las sondas no han llegado ni a la onda de choque ni a la heliopausa. Estamos convencidos de que las ideas arriba expuestas acerca de las características de la heliosfera son correctas. Lo que no sabemos con tanta seguridad es cómo nos debemos imaginar la tercera dimensión. Probablemente tengamos que imaginar las partículas exteriores no en una rotación simétrica, sino más bien en una rotación achatada. Los científicos esperan obtener una respuesta experimental a estas cuestiones con el programa «International Solar Polar Mission», actualmente en preparación, del que hablaremos en el próximo capítulo Sólo entonces se podrá examinar experimentalmente este escenario físico.

XV. CONCLUSIÓN

Las mediciones realizadas con la ayuda de las sondas espaciales y las fotografías por ellas tomadas nos han permitido conocer mejor los detalles físicos de los planetas, desde Mercurio hasta Saturno. La mayoría de estas mediciones se realizaron en la última década, e igual de recientes son muchos de los conocimientos presentados en este libro. Pero las difíciles condiciones económicas que atraviesan la mayoría de los países que han participado hasta el momento en la investigación espacial determinan cara al futuro una clara limitación de estos trabajos científicos. Una de las sondas Pioneer sigue todavía activa, de modo que las grandes antenas de la NASA pueden recibir aún sus señales. Hasta el momento se ha alejado 40 UA del Sol, lo que equivale a 25 veces la distancia Tierra-Sol. Es la mayor distancia desde la que hemos recibido mediciones directas del plasma interplanetario, el campo magnético y la radiación cósmica. Ello nos ha proporcionado la importante información de que la extrapolación que los físicos han realizado para explicar la estructura del espacio interplanetario es correcta en el plano de la eclíptica. Ante todo, se ha visto confirmada la realidad de la estructura en espiral del campo magnético interplanetario que, tal como se suponía, tiene su origen en el Sol y es arrastrado por el viento solar hasta el límite de la heliosfera. ¿Puede existir una confirmación más hermosa de una grandiosa concepción física?

Una de las sondas interplanetarias Voyager, gracias a la cual disponemos de maravillosas imágenes del sistema de Júpiter y de Saturno, voló en enero de 1986 cerca de Urano, pasó en agosto de 1989 por las proximidades de Neptuno y envió mediciones e imágenes de extraordinaria calidad de estos planetas exteriores a la Tierra. La sonda continúa ahora su camino hacia las profundidades del espacio.

Probablemente no se envíe de inmediato otra sonda con destino a los planetas exteriores. En la actualidad se está planeando el lanzamiento de una sonda con destino a Saturno: se ha previsto una sonda que orbite la luna Titán, que posiblemente será capaz de enviar una sonda para que se sumerja en la atmósfera de esta luna. El proyecto se ha bautizado con el nombre de «Cassini», descubridor de varias lunas de Saturno.

Como consecuencia de la catástrofe de Challenger se han retrasado varios años dos grandes proyectos de sondas interplanetarias, como, por ejemplo, la sonda «Galileo», lanzada en 1989 camino de Júpiter, si bien siguiendo una trayectoria indirecta. Para poder disponer de la necesaria energía, la sonda debe ganar una parte de ésta pasando por las proximidades de Venus: el resto de la energía la obtiene pasando dos veces por las proximidades de la Tierra (a 300 km de altitud). Gracias a esta última maniobra, la sonda posee finalmente la suficiente velocidad como para poder llegar a Júpiter y entrar allí en órbita alrededor del planeta. Poco antes de llegar al planeta, se lanzará una sonda que se adentrará en la atmósfera de Júpiter, desde donde enviará datos durante un breve tiempo para acabar quemándose finalmente.

Mucho antes de que «Galileo» llegue a Júpiter, la sonda interplanetaria «Ulysses», lanzada un año más tarde (en octubre de 1990) habrá alcanzado el planeta. Se aproximará de tal manera al planeta que su trayectoria saldrá del plano de la eclíptica para elevarse por encima del polo solar. Orbitará alrededor del Sol, siguiendo una trayectoria elíptica, situada casi perpendicularmente respecto del plano de la eclíptica, cuyo punto más alejado del Sol estará sobre la órbita de Júpiter y cuyo punto más próximo al Sol se encontrará sobre la órbita terrestre. El sobrevuelo de la interesante región polar del Sol durará aproximadamente 200 días. Mientras que la sonda «Galileo» nació como producto de la cooperación entre EE.UU. y la República Federal de Alemania. «Ulysses» es el resultado de la cooperación entre la Agencia Espacial Europea (ESA) y la estadounidense (NASA). Dado que podemos observar el Sol simultáneamente desde la Tierra, podremos observar por primera vez una estrella en tres dimensiones.

Esto no debería tomarse demasiado en serio debido a que la «observación» se refiere en parte únicamente a la banda espectral estrecha accesible a nuestros sentidos. No menos importante, desde el punto de vista físico, es el estudio del campo magnético terrestre, el viento solar, las partículas cargadas de gran energía emitidas por el Sol, la radiación cósmica que, procedente de la galaxia, penetra en el Sistema Solar y las emisiones de fotones del Sol, desde la banda de los rayos X. pasando por el infrarrojo, hasta llegar a la banda de las ondas radio.

Esta misión penetrará también en regiones desconocidas. Naturalmente los físicos hace tiempo que han formulado teorías acerca de la estructura tridimensional del espacio interplanetario, en especial del campo magnético y de la corriente de plasma. Sin embargo, se trata únicamente de extrapolaciones, extraídas de las experiencias bidimensionales, es decir, en el plano de la eclíptica, y proyectadas en tres dimensiones, si bien ampliadas con argumentos de carácter físico, pero que incluyen también algunas suposiciones. Siempre que la física emplea modelos, se ve forzada a hacer este tipo de suposiciones. El siguiente paso consiste en descubrir, mediante hábiles mediciones, si la concepción propuesta por el modelo coincide siempre con dicha «experiencia». Si no es así, hay que cambiar el modelo o modificar las suposiciones, o ambas cosas a la vez.

La ESA situará en 1994, en el marco de otro programa de exploración espacial, la sonda de observación solar «Soho», que se situará en una órbita alrededor del punto de libración entre la Tierra y el Sol. Ese mismo año se pondrá en cierta medida punto final al estudio de la magnetósfera con la misión «Cluster», formada por cuatro satélites que volarán muy próximos unos a otros. A principios de 1989, la NASA envió, camino de Venus, la sonda «Magallanes», cuya misión es enviar imágenes de alta resolución de la superficie del planeta. En julio de 1988, la URSS lanzó dos sondas espaciales. «Fobos I» y «Fobos II», con destino a Marte, de las cuales una alcanzó el planeta. A pesar del fracaso de la misión de acercamiento a la luna de Marte. Fobos, en los meses de febrero y marzo de 1989 se pudieron recoger, durante las órbitas alrededor del planeta

que precedieron a la maniobra, múltiples informaciones acerca del campo magnético y el plasma del planeta.

Estas son las misiones más importantes referidas al estudio del Sistema Solar que forman parte del programa de exploración del espacio. Como puede apreciarse, nos encontramos ante una especie de punto crucial en el que disponemos de una idea general acerca de las propiedades esenciales del Sistema y poseemos suficientes conocimientos acerca de los cuerpos que lo forman, lo que impide que cometamos errores importantes en cuanto a la descripción global de! mismo. Por ello me pareció adecuado recopilar los conocimientos actuales en un libro del que se puede suponer que describirá el Sistema Solar de manera esencialmente «correcta» hasta finales del presente siglo. Estoy seguro de que los grandes rasgos de este cuadro acerca de nuestro entorno cósmico no habrán sufrido modificaciones esenciales antes de esa fecha.

APÉNDICE 1

LAS DISTANCIAS EN EL SISTEMA SOLAR Y FUERA DE ÉL

NUESTRO ENTORNO EN EL COSMOS

El cielo estrellado ha dado siempre alas a la fantasía del hombre, y ello no sólo desde Immanuel Kant. Pero durante mucho tiempo se ha considerado como un enigma la banda de estrellas que se extiende en el cielo de noche: la Vía Láctea. Si bien Kant señaló que la «nebulosa» debía ser considerada como una multiplicidad de estrellas, la explicación de nuestro entorno no se produjo hasta mucho tiempo después.

El estudio del espacio situado más allá del Sistema Solar no fue posible en tanto no se dispuso de telescopios adecuados. Johannes Kepler, que descubrió que las estrellas están mucho más lejos que los planetas, pensaba, sin embargo, que todas las estrellas se hallaban igual de lejos. Hoy sabemos que no es así y en este capítulo vamos a explicar cómo se miden las distancias. La respuesta es muy sencilla: mediante mediciones paralájicas. Pero, ¿qué significa esto?

Supongamos que nos sentamos en una silla y miramos un objeto situado, por ejemplo, a un metro de distancia. Si cerramos el ojo izquierdo, el objeto aparecerá en un determinado punto de la pared. Pero si cerramos el derecho, el objeto se presentará en otro punto de la pared. Esto es lo que se representa en la figura A-l. Los ojos están separados por una distancia D, el objeto se encuentra a una distancia a del ojo, y b es la distancia entre el objeto y la pared. Al ángulo α lo llamamos la «paralaje» del objeto. Ésta es tanto menor cuanto más alejado se halla el objeto y tanto mayor cuanto más separados están los ojos entre sí Para medir distancias, en el ámbito militar se ha utilizado desde hace mucho tiempo un tubo en el que un espejo

desvía hacia el centro los rayos de luz que penetran por dos agujeros situados a una distancia de unos dos metros, siendo luego reflejados hacia los ojos por otro espejo.

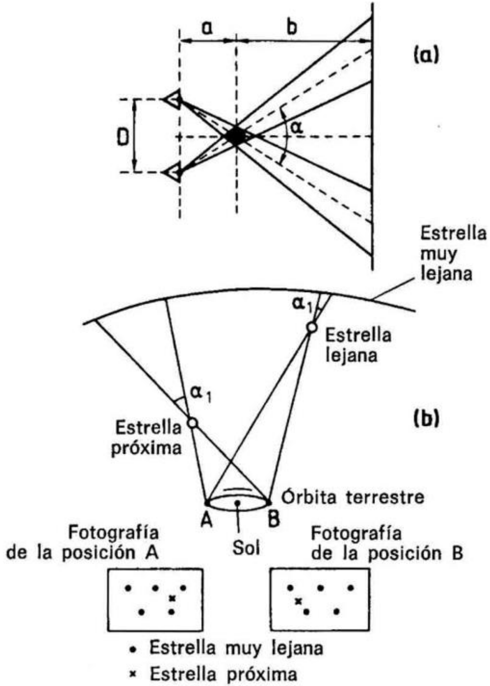


Fig. A-1. (a) Visión espacial: un objeto aparece ante un fondo diferente si lo miramos primero con el ojo izquierdo y luego con el derecho. Este principio del desplazamiento paralájico también se utiliza a menudo en astronomía (b) para calcular distancias.

Tal como se aprecia en la parte b de la figura, este método también se puede aplicar en estrellas muy lejanas; basta con tener una base D suficientemente grande. Mientras que la paralaje de los planetas se determina con bastante exactitud realizando la observación desde dos puntos de la superficie terrestre (de este modo calculó Halley, en 1761, la distancia entre Venus y el Sol), para calcular las distancias de las estrellas es necesario conocer al menos la órbita terrestre. Se determina así

la posición de una estrella en la «esfera celeste», que está definida por las estrellas que no presentan una paralaje que se pueda medir desde la órbita terrestre (esto es, que son objetos situados a gran distancia). Conociendo la base D y el ángulo paralájico ex se puede calcular la distancia a con arreglo a la fórmula siguiente:

$$a = \frac{D}{2/(\alpha/2)}$$

Pero al calcular distancias con ayuda del método de la paralaje hay que tener cuidado. Existe un efecto que debe tomarse en consideración de forma adecuada: tanto la estrella como el observador se pueden mover. Con un movimiento relativo de la estrella y el observador la luz procederá aparentemente de otra dirección, en el fenómeno que denominamos «aberración». Este efecto fue descubierto por el astrónomo inglés J. Bradley, quien quiso mejorar la exactitud de sus mediciones y se vio obligado a reflexionar mediadamente en lo que hacía. Así pues, partimos de la base de que la luz de una estrella llega a un telescopio compuesto de abertura de entrada y ocular. Si el telescopio se mueve en sentido perpendicular a la dirección de la estrella y está ajustado «geométricamente» —el ocular, el objetivo y la estrella se encuentran en línea recta—, la luz que entra por el objetivo no llegará ni siquiera al ocular, pues éste se habrá movido ya hasta otro punto. Por consiguiente, en caso de que se mueva el observador hay que considerar un ángulo que viene dado por la relación entre la velocidad del movimiento y la velocidad de la luz. Esté efecto recibe el nombre de «aberración» (del latín, desviarse) de la luz. Si se consideran el movimiento del observador y el de la fuente, la determinación de la paralaje se convierte en un útil y sencillo instrumento para la medición de distancias en el Universo.

El griego Aristarco realizó de este modo por vez primera la medición exacta de la distancia entre la Tierra y la Luna (v. cap. 1). Hiparco mejoró la medición con posterioridad determinando la posición de la Luna al mismo tiempo en dos lugares muy distantes entre sí. De este modo pudo calcular también la

dimensión de nuestro satélite y —si bien no con mucha exactitud— la distancia entre la Tierra y el Sol (20 veces la distancia entre la Tierra y la Luna). En 1838, el matemático alemán (F. W. Bessel aplicó estas ideas a las distancias estelares. Para ello eligió momentos de observación separados entre sí exactamente medio año, pues entonces la Tierra se encuentra justo en dos puntos opuestos de su órbita elíptica alrededor del Sol. La base para la medición paralájica es en este caso el diámetro de la órbita terrestre, es decir, 2 UA. Por fin descubrió una estrella cuyo desplazamiento paralájico se podía medir desde esa base y con los instrumentos disponibles; esta estrella se incluyó en las tablas astronómicas con el nombre de 61 Cygnus (en la constelación del Cisne). El desplazamiento paralájico descubierto por Bessel era de 0”,6 de arco. A partir de ahí calculó que la estrella se encontraba a una distancia de $1{,}03 \times 10^{14}$ km, suponiendo que no se moviera durante el intervalo de observación de 6 meses. Dado que estas cifras son muy elevadas, los astrónomos acostumbran a expresar las distancias con la ayuda de la velocidad de la luz, no en vano ésta es una constante natural ($c \approx 300.000$ km/s).

Si la luz del Sol tarda unos 8 min en llegar hasta nosotros, la de la estrella 61 Cygnus nos llega después de unos 11 años, y por ello decimos que se encuentra a 11 años luz. Esta estrella es una de nuestras vecinas más cercanas en el cosmos y, según la observación de Bessel, apenas es un poco más pequeña que nuestro Sol. Existen algunas estrellas que están más próximas a nosotros que la 61 Cygnus; la más «cercana» es Alfa-Centauri, que se encuentra a sólo 4,3 años luz (v. tabla A-l) y también se asemeja mucho al Sol.

Ésta fue la primera prueba experimental de que entre el Sol y los planetas las distancias no van más allá de algunas UA, pero que alrededor del Sistema Solar existen años luz de espacio «vacío»; también constituyó una prueba de que hay otros sistemas solares y de que nuestra existencia terrestre no es necesariamente única.

En la actualidad, los astrónomos calculan que en nuestra galaxia (la Vía Láctea) existen unas 4×10^{10} estrellas de características comparables a las de nuestro Sol. Como hemos visto

en el capítulo, hoy se relaciona el origen de una estrella con el colapso gravitacional de una nube de gas o polvo. Por tanto, es natural que fuera de la estrella central se puedan condensar cuerpos a los que, en analogía con el Sistema Solar, denominaríamos «planetas». A través de observaciones radioastronómicas se han descubierto líneas de emisión de moléculas orgánicas especialmente en las zonas en las que podemos apreciar la presencia de polvo y gas interestelar. Sabemos, por tanto, que la formación de tales moléculas es un proceso normal en el espacio interestelar. Así pues, no hay que considerar el origen de la vida un acontecimiento extraordinario. Yo consideraría más bien como un golpe de suerte el hecho de que la Tierra se haya formado precisamente a esa distancia del Sol, lo que constituyó, sin duda, una condición favorable para el desarrollo de la vida. Ésta no hizo su aparición en Venus ni en Marte, a pesar de que la historia de ambos se asemeja mucho a la de la Tierra. Tal circunstancia está relacionada, sin duda, con la radiación solar que llega a su superficie. Una hipótesis satisfactoria es la que señala que siempre que alrededor de una estrella de clase espectral similar gira un planeta a una distancia que permita que a la superficie de este último llegue una intensidad de radiación comparable a la que recibe la Tierra, en principio tendría que ser posible la vida. Estos planetas no se podrían ver directamente y habría que deducir su existencia de manera indirecta, estudiando, por ejemplo, las peculiaridades de su órbita. Este tipo de estudios se ha realizado en diversas ocasiones. Mrs. S. L. Lippincott, del Swarthmore College, en Filadelfia (USA), ha demostrado por vez primera que alrededor de la estrella de Barnard (más pequeña y más fría que el Sol) se mueven uno o dos satélites del tamaño de Júpiter. Las observaciones demuestran que existen otras cinco estrellas más lejanas que tienen planetas; es el caso de la estrella Stein 2.051, situada a 18 años luz, o de CC 1.228, a 30 años luz. Por lo que parece, en la estrella Lalande 21.185 se ha descubierto un planeta que cuenta con una masa diez veces superior a la de Júpiter, en tanto que en 61 Cygni hay otro ocho veces mayor que el más grande de los planetas del Sistema Solar.

El astrónomo Friedrich Wilhelm Herschel observó toda una serie de cúmulos estelares (de los que realizó dibujos), que en principio fueron considerados como soles achatados por la rotación. Immanuel Kant consideró al respecto (en su obra *Naturlehre und Theorie des Himmels*, aparecida en 1755) que era natural suponer que se trataba de sistemas compuestos por muchos soles, esto es, de sistemas de «Vías Lácteas». La Vía Láctea es, en realidad, un aspecto de nuestra galaxia (fig. A-2).

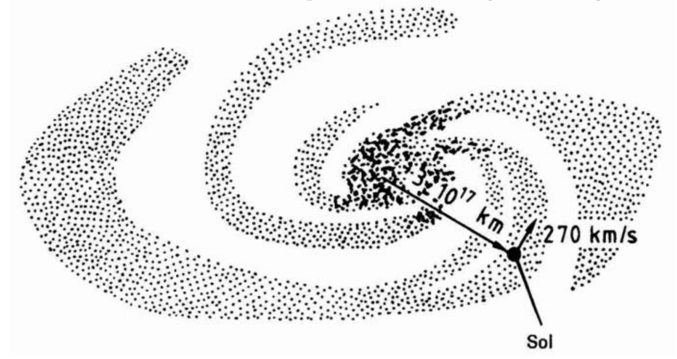


Fig. A-2. Esquema de nuestra galaxia con la posición del Sol.

La evidente «concentración» de estrellas en su banda es un efecto geométrico relacionado con la posición relativa de nuestro Sistema Solar en la galaxia: se encuentra bastante al borde de uno de los brazos de la espiral, en el Brazo de Orión, que también comprende las constelaciones de Perro y Quilla de Barco. En el Brazo de Orión el Sol se halla cerca del borde interior, mientras que las restantes estrellas de la constelación de Orión están en el borde exterior. La observación de un centro galáctico lleno de estrellas despierta en nosotros la idea de una banda: la Vía Láctea. Repartidos de un modo más regular por el cielo encontramos otros grupos de estrellas de características similares a las de nuestra galaxia, pero muy alejados de nosotros. El grupo más próximo, la nebulosa de Andrómeda, se encuentra a una distancia de 1,7 millones de años luz y es algo más pequeña que la Vía Láctea. Las estrellas de ésta giran en tomo a su centro, cuya visión nos está vetada por una nube

de gas interestelar («nube oscura»). La Vía Láctea parece dividirse en este punto (en la constelación de Sagitario). El Sol se encuentra a unos 30.000 años luz del centro de la galaxia, lo que constituye unas dos terceras partes de la máxima distancia que presentan las estrellas a ella pertenecientes. El período de traslación del Sol alrededor del centro galáctico es de aproximadamente 200 millones de años. Esto aparte, la velocidad de traslación aumenta en las proximidades del centro. Las estrellas exteriores se mueven alrededor de este centro en órbitas de Kepler, mientras que las estrellas próximas giran casi «en unión».

Merced a observaciones radioastronómicas hoy sabemos que en el «núcleo» (de varios años luz de diámetro) de la galaxia se emite una intensa radiación de radio, como si allí se encontrara una estrella gigantesca. Alrededor de este núcleo se agrupa un halo de estrellas, más numerosas cuanto más cerca nos hallamos del núcleo mencionado. En este halo se encuentran las más antiguas de las estrellas conocidas, todas ellas gigantes rojas. Los brazos de la espiral, en cambio, contienen fundamentalmente estrellas jóvenes, rodeadas de gas y polvo.

En relación con sus estrellas vecinas el Sol se mueve a una velocidad de 19,4 km/s (movimiento peculiar), lo que se ha confirmado también a través de la medición del efecto Doppler de la radiación de 21 cm de hidrógeno neutro interestelar.

La Vía Láctea tiene aproximadamente 12.000 millones de años. El Sistema Solar, que cuenta con 4.600 millones de años, ha dado desde su origen 23 vueltas en tomo al centro galáctico; la velocidad orbital del Sol es de aproximadamente 230 km/seg. En los brazos de la espiral se aprecia —como se sabe gracias a la observación de otras galaxias— un tipo espectral de estrellas que no se encuentra en el centro de las galaxias. Son las gigantes azules, estrellas luminosas muy calientes o. en otros términos, estrellas «jóvenes». Ello nos hace suponer que en las regiones exteriores de las galaxias todavía hoy se están formando estrellas. Entre las galaxias observables unas presentan una forma circular y elíptica, otras tienen forma de disco y otras, por último, presentan brazos de espiral. Estas formas se

interpretan como diferentes fases de desarrollo: una galaxia circular se considera como un sistema joven que, poco a poco y debido al mantenimiento del impulso de giro del sistema, se achata cada vez más y adquiere forma de disco, con lo que el gas del plano del disco en formación fluye hacia el exterior. Este gas «primordial» sería el «material de construcción» de las estrellas.

Tabla A-1. Distancia y situación de algunas de las estrellas más próximas

Nombre de la estrella	Distancia (años luz)	En la constelación
Alfa Centauri	4.3	Centauro
Estrella de Barnard	5.97	Ofiuco
Wolf 359	7.74	Leo
Luyten 726-8	7.9	Ballena
Lalandé 21.185	8.2	Osa Mayor
Sirio	8,7	Can Mayor
61 Cygnus	11.1	Cisne
Altair	15,7	Águila

(1 año luz = $9{,}5 \times 10^{12}$ km).

Otras galaxias (a menudo reunidas en cúmulos nebulares):

Nombre	Distancia en millones de años luz
Nebulosa de Andrómeda (M31)	2,25
Virgo	36
Hércules	340
Osa Mayor II	1.240

El astrónomo norteamericano E. P. Hubble ha intentado calcular las distancias entre las galaxias y ha descubierto que éstas se hallan repartidas en el espacio de un modo más o menos regular (isótropo), si bien también existen cúmulos galácticos. La Vía Láctea parece formar uno de estos grupos («cluster») junto con la nebulosa de Andrómeda, una galaxia en espiral, seis nebulosas elípticas y cuatro irregulares (entre las que se cuentan las dos Nubes de Magallanes). Se calcula que en el Universo existen 75 millones de galaxias de hasta un tamaño de 21^m. ¿Por qué no van a repetirse miles de veces entre tantas estrellas unas condiciones similares a las de la Tierra y el Sol y, por tanto, también la vida? Por lo demás, la formación de

estrellas es un proceso que tiene lugar continuamente en nuestra galaxia y en otras. Nuestro Sol es una estrella con unas características medias de tamaño, radio, masa y luminosidad, y podemos encontrar sistemas solares en todas las fases de desarrollo: si en unos los planetas se acaban de formar y en otros se encuentran en una fase de evolución similar a la nuestra, no faltan tampoco aquéllos cuya estrella central o «Sol» se ha convertido ya en una enana blanca o en una estrella de neutrones, y en consecuencia la vida ha desaparecido por efecto de un cambio de las «condiciones ambientales».

APÉNDICE 2

LA PRESIÓN DE RADIACIÓN DE LA LUZ

Cuando la luz solar incide sobre un prisma aparece un espectro de colores que abarca desde el rojo hasta el azul; a partir de ellos se forma la luz «blanca». Esto se puede explicar y entender si se considera a la luz como una onda electromagnética con una determinada longitud de onda λ, que se propaga a la velocidad de la luz c. El vector del campo eléctrico que forma esta onda oscila de un lado para otro con una frecuencia v, resultando válida la fórmula $c = v\lambda$. Vamos a explicarlo del siguiente modo: v indica el número de oscilaciones por seg. Una onda se compone de numerosas oscilaciones sucesivas, cada una de ellas con una determinada longitud $\lambda \times v$ que indica, por tanto, la distancia a que se ha movido la onda en un segundo. Ésta es la velocidad de propagación de esa onda.

En una prisma cuyo índice de refracción n es superior a 1 ($n = 1$ se da en el vacío) la luz es desviada de su dirección de incidencia con más fuerza cuanto mayor es λ. De este modo se obtiene el espectro.

Para explicar la difracción de la luz Isaac Newton partió de la base —en aquel momento no se había formulado todavía ninguna teoría de las ondas— de que existen partículas de luz. Esta conclusión resulta casi inevitable para explicar el efecto fotoeléctrico: la velocidad del electrón liberado del material por la incidencia de la luz aumenta con la energía de la luz incidente. Por tanto, cuanto menor sea la longitud de onda de la luz, más rápido será el electrón. En relación con las ondas se pensaría ingenuamente en una conexión con la intensidad de la luz.

Así pues, el concepto de energía tiene que ir ligado a un fotón, y dado que los rayos X son más ricos en energía que las radioondas, la primera ha de ser proporcional a la frecuencia

de la luz. Max Planck formuló la igualdad $E = hv$. La constante h que Planck introdujo en la física es la que conocemos con el nombre de cuanto de acción de Planck, con un valor numérico $h = 6{,}624 \times 10^{-27}$ ergios/s. Se trata de una constante natural universal, como la velocidad de la luz.

Einstein relacionó con esta idea su vinculación de energía y masa derivada de la teoría de la relatividad: $E = mc^2$. Combinando ambas fórmulas podemos atribuir a un fotón la masa

$$m = \frac{hv}{c^2}$$

o, considerando que $\lambda v = c$, también $m = h/c\lambda$. Si se expresa h en ergios/cm, c en cm/s y λ en cm, se aprecia que un fotón «azul» de 400 nm de longitud de onda tiene una masa $m = 5{,}5 \times 10^{-33}$ g, y uno «rojo» de 800 nm de longitud de onda una masa $m = 2{,}7 \times 10^{-33}$ g (1 nm = 1 nanómetro = 10^{-9} m). La masa de un átomo de hidrógeno es, en comparación, de $1{,}7 \times 10^{-24}$ g. Por consiguiente, la presión de radiación de la luz no resulta apreciable para nuestra percepción sensorial.

La presión P de un gas ejercida, por ejemplo, contra una pared se debe a los choques de los átomos de gas contra esa pared. El impulso transmitido g (el producto de la masa m por la velocidad v, g = mv) permite calcular directamente la presión correspondiente. Del mismo modo podemos estimar la presión de radiación ejercida por los fotones sobre los cuerpos (p. ej., partículas de polvo) según la fórmula $P = mc = hv/c$.

Pensemos en una partícula de polvo en el espacio interplanetario; está sometida, por un lado, a la atracción de la gravitación del Sol y, por otro, a la fuerza ejercida por la presión de radiación de la luz, que intenta alejarla del Sol. La presión de radiación que soporta una partícula de polvo depende del perfil, de la longitud de onda de la luz y de las características del material. Esto aparte, la intensidad de la luz, al igual que la fuerza de gravitación, aumenta con el cuadrado de la distancia con respecto del Sol. Por tanto, las partículas de polvo pequeñas se comportan como si la masa del Sol estuviera «rebajada» en la ley de la gravitación. A la presión de radiación se une además

la de las partículas transmitida por el viento solar e igualmente dirigida hacia el exterior. En las proximidades de la órbita terrestre la fuerza transmitida por el viento solar puede superar a la de gravitación en las partículas que cuentan con un diámetro inferior a 0,1 nm.

Las partículas de polvo se mueven en órbitas elípticas, esto es, en una primera aproximación, casi en sentido perpendicular a la línea de conexión con el Sol También a ellas les afecta la aberración de la luz comentada en el apéndice 1: las partículas del viento solar, como los fotones, proceden aparentemente «en diagonal de delante» En consecuencia, estas partículas soportan una fuerza opuesta al sentido de su movimiento, que con el tiempo determina una disminución de su velocidad. Debido a este efecto de frenado, denominado efecto Poyntig-Robertson en honor a su descubridor, las partículas de polvo se mueven hacia el Sol formando espirales. La vida de las partículas muy pequeñas (0,1 µm de diámetro) se reduce así a unos cientos de años y la de las de varios centímetros de tamaño a varios millones (las partículas se vaporizan al aproximarse al Sol). Por otra parte, las de menores dimensiones (y las moléculas) son llevadas hacia el exterior por la presión de radiación. Cuando las partículas tienen además una carga eléctrica, son trasladadas por el viento solar al exterior de nuestro sistema como consecuencia de la acción de las fuerzas eléctricas. Los efectos de erosión reducen también la vida de las partículas: los protones del viento solar que chocan contra la superficie expulsan continuamente átomos de estas superficies (en el denominado «sputtering», término inglés que significa algo así como expulsar) y contribuyen a la reducción constante de las partículas de polvo (típico ~µm/año).

La presión de radiación también ha sido objeto de discusión en relación con su aplicación en el ámbito de la astronáutica. Cuando se expone una superficie grande la radiación solar se ve acelerada, del mismo modo que la vela puede poner en movimiento un barco. Por tanto, una nave espacial que dispusiera de una gran «vela» de este tipo podría maniobrar («cruzar») en el espacio interplanetario. El «viento» estaría constituido en este caso por la luz y el viento solares, que «empujan» en la

eclíptica en la misma dirección. Estas naves espaciales con propulsión «solar sailing» han sido objeto de debate y es posible que se utilicen en un futuro no muy lejano.

APÉNDICE 3

LA LEY DE TITIUS-BODE

Si en un sistema de coordenadas ponemos en un sentido números enteros (0, 1, 2, 3, etc.) y en el otro el logaritmo de las distancias medias de los planetas al Sol o el de las distancias medias de las lunas a los planetas en una unidad cualquiera, se obtienen siempre, sorprendentemente, líneas rectas, ya se trate del Sistema Solar, de Júpiter, de Saturno, de Urano o de Neptuno. Esto resulta especialmente interesante porque hasta el momento no se ha ofrecido una explicación válida de este hecho. Ello se debe a que existen numerosas teorías sobre los detalles del origen del Sistema Solar y no hay pruebas experimentales para decidirse por una o por otra (o incluso por una tercera).

Johann Daniel Titius (1729-1796) fue el primero en apreciar esta regularidad. Se toma, según él indica, la serie de números 0, 3, 6, 12, 24, etc. (caracterizada porque todos ellos —a excepción de los dos primeros— se obtienen multiplicando por dos el número anterior) y se suma 4 a cada cifra así obtenida. Se obtiene entonces el número D'. Si aceptamos que D' = 10D y describimos la serie anterior algebraicamente a través de

$$D' = 10D = 4 + 3 \times 2^n \text{ para } n > 1\text{, números enteros}$$

o

$$D' = 10D = 4 \text{ para } n = 1.$$

entonces D' equivale exactamente a la distancia de los planetas con respecto al Sol (medida en distancias Tierra-Sol, esto es. en unidades astronómicas), como se observa en la tabla.

Titius, profesor de física en Wittenberg, añadió a su traducción de la obra *Contemplation de la Nature*, de Charles Bonnet,

algunos de sus conocimientos, incluyendo la regla mencionada en el capítulo 4. Pero al principio su apreciación no despertó mucho interés. Johann Elert Bode (1747-1826), astrónomo real que recibió las mayores condecoraciones, dio a conocer la regla en su libro *Anleitung zur Kenntnis des gestimten Himmels.* En un principio ocultó el origen del procedimiento, si bien en posteriores ediciones mencionó que procedía de la traducción del libro de Bonnet realizada por Titius en 1772. En lo sucesivo incluyó la regla en muchos de sus escritos, citándola a menudo como «regla de Bode» (Bode eligió el nombre del planeta, entonces recién descubierto, Urano).

Tabla A-2

Planeta	Mercurio	Venus	Tierra	Marte	Ceres	Jupiter	Saturno	Urano	Neptuno	Plutón
n	$-\infty$	0	1	2	3	4	5	6	7	—
Observado	0,39	0,72	1,0	1,52	2,77	5,2	9,54	19,18	30,06	39,4
Regla de Titius	0,4	0,7	1,0	1,60	2,80	5,2	10,0	19,6	38,8	77,2

Históricamente la regla tiene sus raíces en la obra de Kepler *Mysterium Cosmographicum,* en la que el autor intenta describir las órbitas de los planetas mediante polígonos regulares que podían inscribirse en las esferas delimitadas por las órbitas. En otras palabras, Kepler hizo uso de los números enteros para describir el sistema planetario, al tiempo que llamó la atención sobre el gran espacio existente entre Marte y Júpiter.

La regla adquirió mayor interés al descubrirse Urano. Cuando la búsqueda de un planeta a una distancia de 2,8 UA desembocó en el descubrimiento del planetoide Ceres, el procedimiento se empleó de manera sistemática en la búsqueda de Neptuno y adquirió una gran fama. Entre tanto fue perfeccionado en diversos aspectos. El astrónomo Wurm descubrió que la previsión de la regla se mejoraba si en lugar del multiplicando 3 se empleaba el número 2,93 y en lugar del 4 el número 3,87. Poco después W. Gilbert sustituyó en las potencias el número 2 por 2,08.

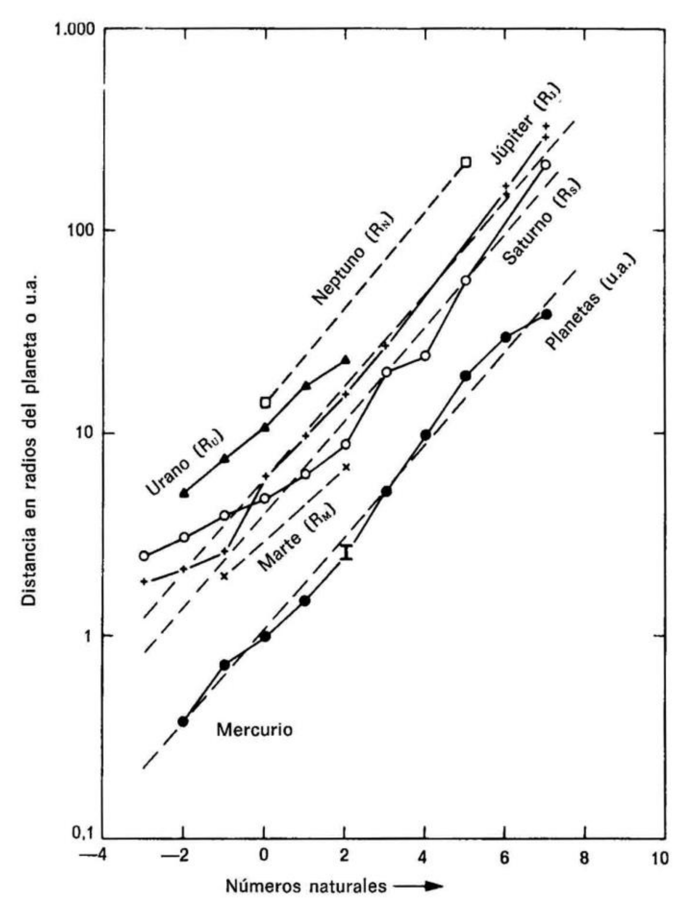


Fig. A-3. La regla de Titius-Bode.

En la figura A-3 se aprecia otra peculiaridad. La curva que une los puntos asignados a los distintos planetas serpentea periódicamente alrededor de la línea recta obtenida. En 1912 este hecho indujo a Miss Mary Adela Blagg (1858-1944) a introducir funciones periódicas. Miss Blagg escribió la relación de la siguiente forma:

$$D_n = A \times (1{,}7275)^n \times [B + f(\alpha + n\beta)].$$

En este contexto *f* representa una función periódica, al tiempo que A, B, α y β son constantes. Si en el sistema planetario se expresan las distancias en UA y en el sistema de lunas de radios del planeta, los mejores valores son, según Miss Blagg, los representados en la tabla siguiente:

	A	B	α	β
Planetas	0,4162	2,025	112º,4	56º,6
Jupiter	0,4523	1,852	113°,0	36°,0
Saturno	3,074	0,0071	118º,0	10°,0
Urano	2,98	0,0805	125°,7	12°,5

En 1945 D. E. Richardson realizó la siguiente simplificación:

$$D_n = (1{,}728)^n \varrho_n (\Theta_n),$$

siendo ϱ_n una función periódica.

Sin embargo, el motivo físico de la existencia de una regla de este tipo permaneció oculto durante mucho tiempo. La circunstancia de que una regla como ésta sea válida no sólo para los planetas, sino también para los sistemas de lunas, debe tener una causa física más profunda. Sus raíces han de buscarse sin duda en el origen del sistema planetario, cuestión de la que nos ocupamos en el capítulo 9.

APÉNDICE 4

EL MOVIMIENTO DE LOS PLANETAS

Mientras que Kepler llegó empíricamente, por así decirlo, a su deducción de las leyes que describen el movimiento de los planetas, conociendo la ley de la gravedad (la fuerza de la gravitación), estas leyes se infieren prácticamente por sí mismas. Si se forma el producto vectorial de la fuerza $\vec{K}$ por el radio vector, se obtiene $\vec{K} \times \vec{r} = 0$, Pero como la fuerza representa al mismo tiempo la variación temporal del momento del impulso G alrededor del Sol, entonces

$$\vec{G} \times \vec{r} = \text{constante.}$$

Éste es precisamente el «principio de las áreas»: el radio vector cubre en tiempos iguales áreas iguales. Se trata de la segunda ley de Kepler (v. fig. A-4).

Para llegar a la primera ley habría que inscribir la ecuación en las coordenadas polares y se obtendría en la forma

$$r = \frac{a(1-\varepsilon^2)}{1+\varepsilon \cos\varphi},$$

siendo ε la excentricidad numérica de la elipse, a el semieje mayor y φ el ángulo acimutal. El área de la elipse es $A = \pi ab = \pi a^2 \sqrt{(1-\varepsilon^2)}$, y aquélla se moverá con un periodo de revolución T. Por consiguiente, con la segunda ley podemos escribir inmediatamente

$$c \times T = \pi a^2 \sqrt{(1-\varepsilon^2)},$$

Si se expresa además la constante superficial C a través de la ley de la gravitación, $C^2 = \gamma Ma (1-\varepsilon^2)$, siendo M la masa del Sol y γ la constante gravitacional, entonces se obtiene

$$\frac{T}{a^3} = \frac{4\pi^2}{\gamma M},$$

esto es, la tercera ley de Kepler Pero dado que los planetas no se mueven alrededor del Sol, sino que Sol y planeta giran juntos en tomo al centro de gravedad común localizado en el foco de la elipse, hay que considerar exactamente el movimiento conjunto del Sol. Con ello se obtiene la forma correcta

$$\frac{T}{a^3} = \frac{4\pi^2}{\gamma(M+m)}.$$

Por tanto. T^2/a^3 no es una constante universal, y presenta valores diferentes en cada planeta.

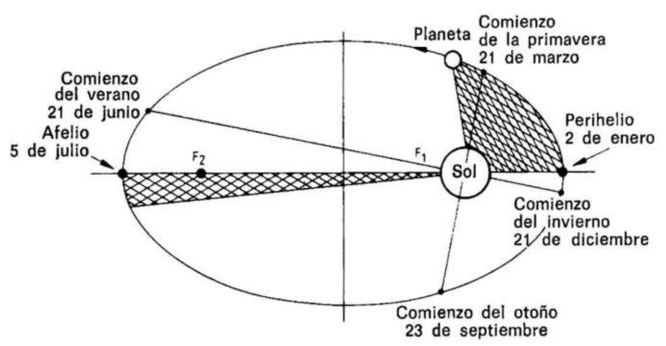


Fig. A-4. Órbita elíptica de un planeta. F_1, F_2: focos. Las zonas sombreadas constituyen áreas iguales, que son cubiertas por el radio vector del planeta en tiempos iguales. Se ha representado la posición de la Tierra en su órbita en los momentos de comienzo del verano, del invierno y en los equinoccios (para hemisferio norte).

La división zodiacal del año se realiza desde antiguo (Acuario. Piscis. Aries. etc.). A lo largo del año el plano ecuatorial de la Tierra se encuentra en dos ocasiones de modo que pasa por el centro del Sol. Por consiguiente, en esos momentos el Sol se halla —prescindiendo de la Tierra— en los puntos de intersección del ecuador celeste y la eclíptica, esto es, en el

punto de primavera (21 de marzo) o en el de otoño (23 de septiembre). En ellos tiene el Sol la declinación 0°; es el momento de los equinoccios.

La velocidad orbital resulta ser menor en el afelio (fig. A-4) que en el perihelio, circunstancia que determina que en el hemisferio norte el semestre de verano sea 7,5 días más largo que el de invierno.

APÉNDICE 5

LOS PUNTOS DE LIBRACIÓN: LA SITUACIÓN DE LOS «TROYANOS»

Los puntos de libración constituyen la solución específica al «problema de los tres cuerpos reducidos». Fueron descubiertos por Lagrange en 1792 y en el pasado despertaron gran interés como problema de la mecánica celeste. En la actualidad se ha reavivado de nuevo este interés en relación con la cuestión de la localización de los satélites artificiales.

El lugar geométrico de estos puntos de libración en un sistema compuesto por dos cuerpos Ml y M2 que giran en torno a un centro de gravedad común es, en lo esencial, constante (en unas coordenadas en co-rotación): tres puntos de libración se encuentran en la línea recta que une los dos cuerpos (L1, L2 y L3 en la fig. A-5), y otros dos forman un triángulo isósceles con los dos cuerpos. Si se coloca un punto de masa (p. ej., un satélite) en uno de estos cuerpos con la velocidad adecuada, se mantiene en un estado de equilibrio, pues la aceleración de la gravitación y la centrífuga se compensan.

Para resolver el problema se considera el movimiento de un punto de masa en el campo de gravitación de dos cuerpos de igual masa (M1, M2, p. ej., el Sol y la Tierra o la Tierra y la Luna) que se hallan a una distancia R y que se mueven en órbitas elípticas alrededor de un centro de gravedad común S (fig. A-5).

Calculando la energía cinética y potencial de este punto de masa en unas coordenadas en co-rotación, se pueden formular según el método de Lagrange tres ecuaciones diferenciales de segundo orden, cuyá solución nos permite encontrar los puntos de libración. Desde el punto de vista físico, estas soluciones son estacionarias en el caso de órbitas circulares, mientras que en el de órbitas elípticas varían periódicamente las distancias

entre los puntos de libración y las masas M1 y M2, manteniéndose, sin embargo, la colinealidad (L1, L2, L3) y el carácter equilátero de los triángulos (L4, L5). Gráficamente podemos imaginar del siguiente modo el campo potencial modificado en las coordenadas en co-rotación: los dos puntos de masa M1 y M2 son «valles» del campo potencial, mientras que los puntos de libración L4 y L5 constituyen «cúspides» en este campo. Por lo que se refiere a los puntos de libración L1, L2 y L3, se trata de «puntos de paso», similares a puertos de alta montaña: el terreno desciende en dos sentidos opuestos, mientras que asciende en sentido perpendicular a ellos. Una masa que se mueve en las direcciones mencionadas volverá a caer siempre en su punto de partida (equilibrio estable), pero si se mueve en sentido perpendicular a ellas, rodará hacia los valles M1 y M2 (equilibrio inestable).

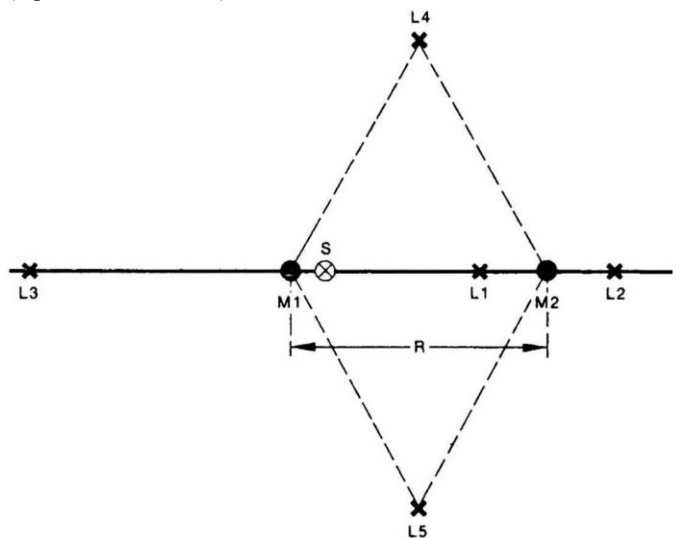


Fig. A-5. La situación de los puntos de libración

Por consiguiente, el punto de masa no se encuentra en una posición «absolutamente» estable, sino más bien en una estabilidad «relativa». Por este motivo, si hay que situar un satélite

en un punto de libración no se le puede abandonar. Es necesario hacer algo para mantener su posición, realizando maniobras de corrección de la órbita («station-keeping»), habida cuenta de las alteraciones orbitales determinadas por otros planetas, por la Luna, la presión de radiación del Sol. etc.

Pero también se puede situar un satélite en una órbita cuasi periódica alrededor de un punto de libración. Así, por ejemplo, un satélite emplazado en un punto de libración entre la Tierra y el Sol no debe estar directamente delante del Sol, ya que la radiación de radio de éste taparía sus señales radioeléctricas. Debe describir una órbita que, por así decirlo, «evite» el disco solar. Por conveniencia, el plano de su órbita no se coloca en el del movimiento de las masas M1 y M2. En el plano perpendicular a él su movimiento es periódico, debiendo estar orientado en la dirección de las «montañas» ascendentes. De este modo se llega a órbitas periódicas que, de relativa estabilidad en tomo al punto de libración, no tienen el carácter de figuras de Lissajou ni son del tipo de las órbitas de «halo» (de acuerdo con dos clases de solución del problema).

A mediados de 1978 se realizó una primera aplicación práctica del «anclaje de un satélite en un punto de libración» con el ISEE-C. Se trata del tercer satélite del programa «International Sun-Earth-Explorer», organizado en común por las organizaciones espaciales norteamericana y europea (NASA y ESA). Aparte de ésta, se ha formulado ya un buen número de propuestas diferentes para aprovechar prácticamente estos «nichos de la naturaleza», debido ante todo a que el gasto de combustible en el «station-keeping» en el punto de libración es considerablemente menor que el que supone, por ejemplo, el mantenimiento de la posición de un satélite geoestacionario (satélite de comunicaciones). Una de estas ideas consistía en anclar satélites en un punto de libración del sistema Tierra-Luna mediante «solar sailing», es decir, manteniendo la posición del satélite con la ayuda de la presión de radiación del Sol En el caso de que se instalen bases en la Luna la comunicación se puede mantener también con puntos de la cara oculta del satélite gracias a la ayuda de un satélite situado en el punto de libración L2 del sistema Tierra-Luna. Para las misiones interplanetarias alguien

pensó —en la época del Shuttle— en situar, en los puntos de libración del sistema Sol-planetas, depósitos entre los cuales pudiera circular un Shuttle (con poca propulsión).

APÉNDICE 6

FUERZAS SOBRE CUERPOS EN ROTACIÓN

Si consideramos a un planeta como una esfera rígida —lo que en una primera aproximación resulta exacto—, podemos imaginar, como observadores también en rotación, las fuerzas a que vamos a ser expuestos. En este terreno tenemos que utilizar algunas fórmulas y recurrir a las matemáticas. Lo primero que experimentamos es la fuerza de la gravedad, que viene dada por

$$F = K\frac{mM}{r^2}.$$

($K = 6{,}67\times10^{-8}$ cm^3 g^{-1} s^{-2}, constante gravitacional). Por otra parte, la fuerza que actúa sobre un cuerpo de masa m es igual al producto de esa masa por la aceleración experimentada: $F = mg$. Aplicando esto a la fórmula anterior podemos calcular la aceleración de la gravedad de la Tierra (masa M) ejerce sobre nosotros en $g = KM/r^2$.

Por otro lado, todos sabemos que en la rotación de un cuerpo en tomo a un eje se forma una fuerza centrífuga que podemos comprobar, por ejemplo, con un hilo tenso y un cuerpo fijo a él. Como se observa en la figura A-6, la fuerza centrífuga actúa en sentido perpendicular al eje de rotación con un ángulo φ con respecto a la vertical en el punto P, en el que nos encontramos nosotros (φ es la latitud geográfica). La fuerza centrífuga es el producto de la masa m de un cuerpo por la aceleración centrífuga b. Esta última se calcula mediante la fórmula $b = v^2/r$, siendo v la velocidad en el punto P. La distancia respecto del eje de rotación es $r = R \cos \varphi$, y la velocidad angular de la rotación de la Tierra Ω viene dada por $\Omega = 2\pi/(1 \text{ día estelar}) = 7{,}29\times10^{-5}$ s^{-1}, por consiguiente, $v = r\Omega = R$Q $\cos \varphi$, calculándose, por fin, la fuerza centrífuga

$$F_c = m\,\Omega^2 R \cos \Phi.$$

La fuerza centrífuga tiene una componente en el sentido de la vertical y una componente tangencial a la superficie terrestre en dirección al ecuador (fig. A-6)

$$F_c = m\,\Omega^2 R \cos \Phi \text{ sen } \Phi$$

Esta fuerza actúa también sobre los elementos de la corteza terrestre; a lo largo de la historia de la Tierra ha desplazado trozos de corteza hacia él ecuador, determinando la formación del abombamiento de la región ecuatorial. Los radios polar y ecuatorial de la Tierra presentan en la actualidad una diferencia de 21,4 km.

Si un cuerpo se mueve sobre la superficie de una esfera en rotación experimenta además otra fuerza: la fuerza de. Coriolis. Supongamos que se mueve a lo largo de un meridiano a la velocidad v_2.

Aparecen entonces dos componentes de la fuerza centrífuga: una orientada en sentido radial $F_1 = m\,R\,\mu^2$ y la fuerza ya mencionada perpendicular al eje terrestre $F_2 = m\,R\,\Omega^2 \cos \varphi$. En la superficie aparece otra fuerza adicional que se puede denominar «fuerza centrífuga compuesta», pero que generalmente recibe el nombre de fuerza de Coriolis. Se calcula según la fórmula

$$C = 2\,mv_r\,\Omega \text{ sen } \Phi,$$

siendo v_r la velocidad relativa de un punto de masa con respecto al sistema de referencia en rotación. La dirección de la fuerza de Coriolis de- pende de la situación sobre la esfera terrestre. C es perpendicular a la dirección del movimiento, por lo que no altera la energía de éste. En los ríos del hemisferio norte, por ejemplo, esta fuerza determina una presión sobre la orilla derecha (en el sentido de la corriente), en tanto que en el hemisferio sur la presión se ejerce sobre la orilla izquierda. Esto provoca una mayor erosión de la orilla correspondiente y; en espacios de tiempo geológico, un desplazamiento del río. La

corriente del Golfo también está sometida a la fuerza de Coriolis, por lo que es desviada, en el hemisferio norte, hacia su derecha. Las corrientes atmosféricas cambian de dirección bajo el efecto de esta fuerza: las desviaciones hacia la derecha en el hemisferio norte determinan, por el paso del aire de una zona de alta presión a otra de baja, la constitución de ciclones: en el hemisferio sur se forman de un modo semejante los anticiclones. En la caída libre de un cuerpo sobre la Tierra apreciamos no sólo una desviación hacia el este (debido a la mayor velocidad de rotación del cuerpo mantenido sobre la superficie terrestre), sino también una desviación hacia la derecha o hacia la izquierda según el hemisferio.

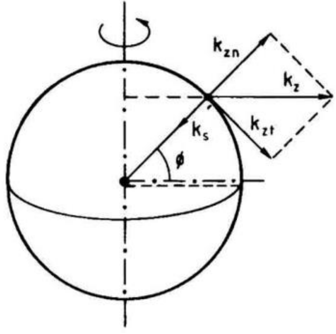


Fig. A-6. El movimiento relativo: la fuerza centrífuga que actúa en sentido perpendicular al eje de rotación divide las componentes en dos: paralela al radio vector y paralela a la superficie terrestre. Mientras que la primera es opuesta a la fuerza de gravedad, a la segunda sólo se opone la rigidez del material. La fuerza centrífuga determina la formación del abombamiento ecuatorial del planeta.

La fuerza de Coriolis resulta muy fácil de comprender: si se avanza desde el ecuador hacia el polo, dado que la distancia al eje de rotación disminuye en dirección polar hasta llegar a cero, siempre se tiene una velocidad de rotación (de la Tierra) superior a la que existe en el propio polo, produciéndose una desviación hacia el este de la dirección meridiana. Si se avanzara en sentido paralelo al eje de la Tierra, la fuerza de Coriolis sería nula. Orientándose en dirección vertical hacia arriba, la acción de la fuerza de Coriolis se produce en sentido opuesto.

APÉNDICE 7

DESINTEGRACIÓN RADIACTIVA Y MÉTODOS DE DATACIÓN

Los núcleos atómicos están compuestos de protones y neutrones. Los protones con carga eléctrica determinan el número atómico del núcleo atómico en cuestión; los protones y los neutrones en conjunto definen su masa Sólo son estables en el tiempo los núcleos atómicos cuyo número de protones y neutrones se encuentra en la zona sombreada del diagrama representado en la figura 9-1. En él se ha representado en sentido horizontal el número de neutrones (N) de los núcleos atómicos y en sentido vertical el de protones (Z). Z = N corresponde a los núcleos que contienen igual número de protones y neutrones. En los núcleos con poca masa (N + Z = A: peso atómico) la línea Z = N es idéntica a la línea N = Z. En los números músicos superiores (p. ej., por encima del silicio) la zona estable cambia de modo apreciable en dirección a un mayor número de neutrones. La causa de este hecho radica en que en el núcleo atómico actúan dos tipos de fuerzas, las que están relacionadas con un término simétrico e intentan conseguir que N = Z. y una fuerza de Coulomb, que aspira a mantener Z lo más bajo posible. La composición de los núcleos atómicos mantiene la regularidad señalada por la curva sombreada. Las dimensiones del núcleo son del orden de 10^{-13} cm, y un valor semejante presentan las fuerzas activas y la energía necesaria para que un núcleo atómico se desintegre o se modifique por la inclusión de otros elementos Esto aparte, en determinadas transformaciones de los núcleos atómicos es posible liberar grandes cantidades de energía No son sólo los hombres los que determinan tales transformaciones de los núcleos atómicos: la naturaleza también las realiza, y en dimensiones cósmicas. En calidad de núcleos que chocan dispone de la radiación cósmica,

en la que se manifiestan energías de las partículas de hasta 10^{20} *e*V (la energía de un *e*V —electronvoltio— corresponde a una partícula que tiene una carga elemental y que ha atravesado una diferencia de potencial de 1 voltio). Si un núcleo choca con otro núcleo con energía suficientemente alta, pueden ser expulsados protones, neutrones, núcleos de helio y otros. Queda un núcleo que no se ha modificado químicamente (esto es. que se ha convertido en isótopo de otro elemento porque ha cambiado el número atómico) o que se ha convertido en un isótopo del mismo elemento (ha cambiado el número de neutrones del núcleo). Por regla general, los isótopos formados de este modo no son estables y se desintegran espontáneamente en otros elementos u otros isótopos, emitiendo componentes nucleares ricos en energía: son, por tanto, radiactivos Esta desintegración radiactiva presenta regularidades sencillas, pues la probabilidad de la desintegración espontánea de un determinado isótopo es la constante λ, característica del núcleo en cuestión e independiente de influencias externas. Al valor inverso de la constante de desintegración se le denomina tiempo de semidesintegración T. Por consiguiente, si tenemos N núcleos, el índice de desintegración por intervalo de tiempo será Δt: $N \times \lambda \times (\Delta t)$. Si en el momento cero existen N_0 núcleos atómicos, en un momento posterior *t* habrá $N = N_0 \times e^{-\lambda t}$ de tales núcleos atómicos: en un material en el que en el momento de su formación había N_0 núcleos de un elemento radiactivo de larga vida que se desintegran en N_1 de otros núcleos, que a su vez siguen desintegrándose, la proporción de números de núcleos en el equilibrio radiactivo será $N_1/N_0 = T_1/T_0$; en consecuencia, los números de núcleos mantienen entre sí la misma proporción que los tiempos de desintegración. Equilibrio radiactivo significa que de cada parte de la serie de desintegración se forma y desintegra un número siempre igual de átomos. Conociendo ambos esquemas de desintegración se puede calcular la edad de un material midiendo la concentración de la sustancia primaria (N_0) y de la sustancia secundaria (N_1). Así pues, en este método de datación radiactivo se mide la edad del material en unidades de las constantes del tiempo de desintegración. Hace ya mucho tiempo que-se utilizan estos métodos. En la datación de minerales se

emplean a menudo los métodos del uranio-plomo y el uranio-helio. Dado que en un principio existían, sin duda, uranio y plomo, midiendo la concentración de ambos se puede fijar un límite superior de la edad del mineral. El uranio 238[23] se desintegra con un período de semidesintegración de 4,56 millones de años, atravesando numerosas fases intermedias, hasta pasar a plomo 206 estable El uranio 235 se desintegra, con un período de semidesintegración de 713 millones de años, en plomo 207. A través de la desintegración α, bastante frecuente, se forma también helio (las partículas a son núcleos de helio), una parte del cual puede haber escapado del material. Por ello, el método uranio-helio fija un límite inferior para la edad del material Por otra parte, se puede determinar la proporción entre plomo 207 y plomo 206 Dado que la proporción de isótopos $U^{235}/U^{238} = 1 : 137{,}8$ es muy constante en el uranio natural, a partir de la proporción V entre ambos isótopos del plomo se puede calcular la edad del mineral en $t = \ln (137{,}8 \times V) \times 0{,}845 \times 10^9$ años.

Para realizar dataciones más recientes se emplea ante todo el método del «carbono radiactivo» —generalmente denominado método del carbono 14—, descubierto por el químico norteamericano W. F. Libby. La radiación cósmica crea en el nitrógeno (^{14}N) de la atmósfera el isótopo radiactivo del carbono 14, que se sigue desintegrando con un período de semidesintegración de 5.720 años a través de la desintegración beta por la emisión de un electrón. En las reacciones químicas de la atmósfera también se oxida ^{14}C formando CO_2. Por tanto, los seres vivos incorporan a la materia orgánica carbono radiactivo en su concentración natural en el aire y mantienen un intercambio continuo con la atmósfera, tomando ^{14}C. Con su muerte comienza la desintegración de éste último sin que se produzca al mismo tiempo un nuevo aporte de este isótopo. Calculando la proporción entre ^{12}C y ^{14}C en los restos de organismos se puede determinar su edad: a partir del tiempo de semidesintegración

[23] El número másico del isótopo se indica generalmente con la forma U^{238}.La escala se basa en el oxígeno, cuya masa es de 16.00.

T de $1{,}804\times10^{11}$ seg se obtiene un índice de desintegración de $5{,}5\times10^{-12}$ átomos por seg (o $1{,}75\times10^{-4}$ por año). Así pues, de una tonelada de carbono 14 sólo se desintegran 175 g al año. Casi todo el ^{14}C se forma en la atmósfera por la captura de neutrones de nitrógeno ^{14}N. Estos neutrones surgen en virtud de reacciones nucleares de la radiación cósmica primaria con núcleos atómicos atmosféricos Pierden energía en los choques con átomos del aire y, como neutrones lentos, pueden ser atrapados fácilmente por núcleos de nitrógeno a altitudes en tomo a 100 mb de presión atmosférica (lo que equivale a unos 20 km). Dado que el campo magnético terrestre forma una especie de pantalla contra la radiación cósmica, más fuerte en el ecuador que en los polos, la producción de ^{14}C varía con la latitud (es superior en las latitudes altas). La actividad del Sol también influye sobre la radiación cósmica: en el máximo de actividad la intensidad de ésta es menor y en el mínimo alcanza sus valores más elevados En una columna de aire de 1 cm^2, la producción de ^{14}C oscila, por término medio, entre 2,1 y 2,6 átomos por seg en el máximo y en el mínimo de manchas solares.

A lo largo de 10 ciclos de manchas solares se ha podido calcular una producción de ^{14}C de ~2.5 átomos de ^{14}C por seg en una columna de aire de 1 cm^2 de superficie. El Sol también emite en ocasiones partículas cargadas muy ricas en energía que están en condiciones de producir neutrones en la atmósfera terrestre Esto puede determinar un aumento de la producción de ^{14}C en la atmósfera de 0,1 átomos por cm^2 y seg. El cálculo resulta sencillo: en la atmósfera terrestre se producen —con las intensidades antes mencionadas— 15,4 g de ^{14}C por día. Si las pérdidas fueran superiores a la producción, no existiría ^{14}C en la atmósfera. De ocurrir lo contrario, habría un exceso Por consiguiente, debemos partir de la base de que existe un equilibrio natural y calcular la masa total de ^{14}C de la atmósfera en $15{,}4 \times 365/175 \times 10^{-4}$ g = $3{,}2\times10^{4}$ kg. Este carbono radiactivo desciende lentamente de la estratosfera a la biosfera, en donde una parte pasa a los organismos.

GLOSARIO

Acoplamiento órbita-spin: Acoplamiento del período de rotación de un cuerpo y el período de revolución alrededor de un cuerpo central. Así, por ejemplo, el rozamiento de las mareas ha determinado que el período de rotación de la Luna sea igual a su período de revolución alrededor de la Tierra, de modo que nos muestra siempre la misma cara. Cuando los momentos de inercia de un cuerpo no son iguales, y este último presenta una distribución asimétrica de las masas en torno a su eje de rotación, el resultado puede ser contrario al efecto de marea, con lo que al final no se establece el movimiento sincrónico, sino un múltiplo de la velocidad orbital (efecto de resonancia). En Mercurio, por ejemplo, existe una resonancia de 3/2 entre el período de rotación y el de revolución.

Aerosol: Partícula de polvo muy pequeña suspendida en el aire.

Afelio: Punto más alejado del Sol en la órbita elíptica de un cuerpo que gira alrededor de aquél.

Agujero negro: Final de la evolución de una estrella de mucha masa. Se supone que en un agujero negro la fuerza de gravitación es tan intensa que ni siquiera puede escapar la radiación electromagnética.

Año luz: Distancia recorrida por la luz en un año, igual a 9,46 billones de km ($9{,}46 \times 10^{12}$ km).

Basalto: Grupo de rocas volcánicas más extendido. La coloración oscura se debe a la magnetita, la ilmenita y el piroxeno.

Biosfera: Zona próxima a la superficie caracterizada por la existencia de vida.

Calor de condensación: Calor liberado durante la condensación del vapor.

Centellómetro: Cuando las partículas rápidas pierden energía en el material adecuado (a causa, p ej., de los choques), aquélla puede servir de energía de estimulación para ciertos átomos y ser emitida de nuevo como luz por éstos. Midiendo la luz emitida es posible determinar la energía de las partículas cedida al material

Colapso gravitacional: Derrumbamiento de materia producido cuando la presión interior desciende bruscamente hasta cero (durante, p. ej., la combustión de una estrella). La duración del colapso depende sólo de la densidad media, no del tamaño del objeto.

Cometa: Cuerpo pequeño, de 1-10 km de diámetro, que, compuesto probablemente de polvo y helio ("bola de nieve" sucia), al aproximarse al Sol pierde gas y polvo debido al calentamiento que experimenta.

Convección: El gas caliente asciende en el campo de gravedad debido a su menor densidad; el calor determina un movimiento de convección en los gases o fluidos.

Corona: Capa externa del Sol, casi circular durante el mínimo de manchas solares, con largas prolongaciones en el ecuador durante el máximo de manchas solares, momento en el que presenta además un sistema radial en los polos.

Corteza: Capa sólida externa de los planetas interiores, de Marte y de numerosas lunas. La corteza terrestre presenta un espesor de aproximadamente 33 km.

Cosmogonía: Teoría sobre la formación del Universo.

Cosmología: Descripción del Cosmos, del Universo. En la actualidad la hipótesis más interesante es la del "estallido primario", que describe la evolución del Cosmos desde el momento cero.

Cosmoquímica: Estudio de las propiedades químicas y la composición de la "materia cósmica", es decir, de los meteoritos o. por ejemplo, de las rocas lunares.

Cristalización fraccionada: Separación de tipos de cristales distintos, en una mezcla.

Cromosfera: Capa de unos 8.000 km de espesor que se encuentra a continuación de la fotosfera del Sol hacia el exterior y en la que la densidad del gas disminuye bruscamente, pero la temperatura aumenta de nuevo.

Cuerpos negros: Cuerpos que absorben cualquier radiación (idealizado). Un cuerpo negro de una determinada temperatura emite más radiación que otro cuerpo diferente pero de igual temperatura.

Declinación: Distancia angular entre un astro y el ecuador celeste.

Desintegración radiactiva: Emisión espontánea de partículas del núcleo atómico. Pueden variar la masa y/o el número atómico, con lo que el núcleo se convierte o en un isómero (elemento distinto con la misma masa) o en un isótopo (núcleo con igual número atómico pero diferente masa) del núcleo original

Diferenciación: Durante un proceso de solidificación cambia constantemente el fluido, no en vano pierde materiales a causa de la cristalización, con lo que a medida que avanza el proceso de solidificación se hace imposible la formación de minerales

Dinamo: Las comentes mecánicas en el núcleo de un cuerpo celeste pueden determinar intensas corrientes eléctricas, que crean un campo magnético apreciable hacia el exterior.

Dipolo (dipolo eléctrico) o imán elemental (dipolo magnético): Estructura con las cargas positivas y negativas separadas en el espacio.

Disociación: Desintegración de las moléculas en determinados componentes (átomos y/u otras moléculas).

Eclíptica: Plano de la órbita terrestre alrededor del Sol. Equivale a la órbita aparente del Sol en la “bóveda celeste”.

Efecto de invernadero: El máximo de emisión del Sol (5.780 grados) se encuentra en la parte amarilla del espectro. Si un cuerpo absorbe energía, se calienta y emite radiación de acuerdo con su temperatura. Las temperaturas que se dan

habitualmente en la superficie terrestre corresponden a una emisión de radiación en la zona del infrarrojo. Cuando en la atmósfera hay gases que absorben en esta zona del espectro, aquélla será opaca para esta radiación. La superficie no puede irradiar, ya que calienta la atmósfera del entorno, con lo que también se calienta ella misma. No hace falta impedir la entrada de radiación; como todos sabemos, los gases —por ejemplo el vapor de agua o el anhídrido carbónico— son transparentes en la luz visible.

Efecto de marea: Durante el movimiento de una luna alrededor de un planeta la fuerza de atracción del planeta actúa con mayor intensidad sobre la cara de la luna dirigida hacia él. Si la luna fuera "blanda", se deformaría hasta convertirse en una especie de "cigarro". En caso de que rotara, se formaría una montaña en la cara dirigida hacia el planeta, esto es, se formaría una especie de marea en sentido opuesto a la rotación de la luna La energía necesaria para la deformación se transforma, a través del rozamiento, en calor. La energía procede del movimiento de rotación y la velocidad de ésta disminuye hasta que la luna muestra siempre la misma cara al planeta, con lo que ya no se producen más deformaciones.

Efecto Doppler: Un observador que se mueve respecto a una fuente de oscilación percibe una elevación o una disminución de la frecuencia de una onda según se acerque o se aleje de dicha fuente.

Equilibrio de radiación: Cuando los cuerpos sólo pueden variar su temperatura por un intercambio de radiación, el más caliente se enfría, en tanto que el más frío se calienta hasta que la energía emitida es igual a la recibida en ambos.

Equinoccios: Momentos de igualdad entre el día y la noche, el 21 de marzo y el 23 de septiembre. El Sol se encuentra en estos días en el plano ecuatorial, por lo que en todos los puntos de la Tierra sale por la mañana a las 6 horas y se pone por la tarde a las 18 horas locales.

Escala de temperatura: Para medir la temperatura se emplea una escala que se divide en cien partes desde el punto de fusión del hielo y el punto de ebullición del agua (en condiciones normales). Se habla entonces de la escala de “grados Celsius". Otra escala semejante, pero cuyo punto cero es el cero absoluto (–273,2 grados Celsius), es la constituida por los “grados Kelvin”, la denominada escala termodinámica, habitualmente utilizada en física.

Estratosfera: Capa de la atmósfera situada entre la tropopausa y unos 50 km de altitud.

Estrella de neutrones: Estado final de una estrella de tamaño medio.

Estrellas gigantes: Estrellas de gran luminosidad y grandes dimensiones.

Excentricidad: Proporción entre la distancia del foco y el centro de una elipse y el semieje mayor.

Fotosfera: Capa del Sol de unos 400 km de espesor que, luminosa en la luz visible, en el borde superior alcanza una temperatura de 4.300 grados y en el inferior de 9.000.

Fusión nuclear: Formación de núcleos atómicos a partir de sus componentes más ligeros (a partir, p. ej., de núcleos de helio e hidrógeno). Debido a las intensas fuerzas de enlace que ejercen los núcleos entre sí, durante este proceso se libera una gran cantidad de energía. Las estrellas reciben su energía de estos procesos.

Gabro: Roca plutónica básica (v. Granito).

Gradiente: Medida del aumento de una función.

Granito: Durante la solidificación de los silicatos también se forma, con un enfriamiento lento, granito, que es una roca plutónica típica.

Impulso: Producto de la masa por la velocidad. En un sistema cerrado existe un principio de la conservación para el impulso.

Impulso de giro: Producto del momento de giro por el momento de inercia. En un sistema cerrado se puede aplicar un principio de la conservación al impulso de giro.

Inclinación: Ángulo entre el plano de la órbita de un satélite y el plano ecuatorial.

Inducción (eléctrica): Modificando el flujo magnético se forma en un conductor una diferencia de potencial (ley de la inducción de Faraday, 1831).

Inestabilidad: Alteración de un estado debido a una modificación de las condiciones externas.

Infrarrojo: Longitud de onda situada más allá del rojo de la luz visible, en la zona de onda larga.

Ionización: Pérdida de uno o varios electrones por parte de un átomo o molécula, con lo que éste queda con una o varias cargas positivas.

Ionopausa: Zona altitudinal en la que la densidad de electrones disminuye bruscamente.

Ionosfera: Zona situada entre 100 y 400 km de altitud caracterizada por su elevada conductividad eléctrica.

Isótopo: Los diversos isótopos de un elemento se diferencian entre sí en la masa, y no en la carga del núcleo, que determina la configuración de electrones de la capa del átomo. Por consiguiente, las propiedades químicas de los isótopos de un elemento son iguales.

Lagunas de Kirkwood: Los cuerpos tienen períodos de revolución alrededor del Sol que mantienen con el de Júpiter una relación de números enteros. Las resonancias así formadas determinan la aparición de fuerzas perturbadoras que, por ejemplo, pueden sacar a un asteroide de su órbita. En la zona de 2-3 UA de distancia del Sol se encuentran las resonancias 1/4, 2/7, 1/3, 2/5, 3/7 y 1/2, que no están ocupadas por asteroides.

Luz polar: Fenómeno luminoso de las capas altas de la atmósfera producido como consecuencia del bombardeo con electrones; aparece durante las tempestades magnéticas en

las zonas polares, y en el curso de las alteraciones magnéticas intensas es visible también en las latitudes más bajas.

Luz zodiacal: Fenómeno luminoso cuyo plano de simetría es la eclíptica y que se produce por la dispersión de la luz solar en el polvo y en los electrones que se hallan en las proximidades del Sol.

Magnetopausa: Capa que rodea a la magnetosfera, y en la que el campo magnético terrestre desciende hasta alcanzar el valor del campo magnético interplanetario.

Magnetosfera: “Cavidad" producida por el campo magnético terrestre en el viento solar; su estructura está determinada por las características del campo magnético terrestre.

Manchas solares: Zonas de la fotosfera más frías y, por tanto, más oscuras que su entorno. Al comienzo del ciclo aparecen en las latitudes altas, en tanto que, a lo largo de los 11 años del mismo se van formando más cerca del ecuador. Su duración oscila entre unos días y varias semanas.

Manto: Capa intermedia entre el núcleo y la corteza.

Mesosfera: Capa que, situada por encima de la estratosfera, se extiende hasta la mesopausa (también denominada turbopausa), a 90 km de altitud.

Momento de giro: Una fuerza K que actúa a una distancia L de un eje ejerce sobre éste un momento de giro $M = K \times L$. siendo K la componente de la fuerza en el sentido del giro.

Momento de inercia: Paso en el movimiento de rotación en el lugar de la masa.

Momento dipolar: Producto de la carga, o intensidad de los polos, por la distancia entre ambos.

Neutrón: Partícula elemental con la masa de un núcleo de hidrógeno y sin carga eléctrica.

Nova: Estrella cuya luminosidad aumenta bruscamente en pocos segundos. Es probable que durante una “explosión" de este tipo se desprenda la capa de gas de una estrella. Se produce como consecuencia de reacciones nucleares que, iniciadas repentinamente, producen inestabilidad.

Núcleo: El centro de un planeta. Tras la condensación, algunos cuerpos se volvieron a fundir a causa del calor liberado por la contracción gravitacional y de la desintegración radiactiva, por lo que se formaron núcleos de una densidad muy elevada.

Nutación: Una peonza apoyada en un centro de gravedad que no está sometida a ninguna otra fuerza tiene un determinado impulso de giro; el eje de simetría del cuerpo describe un cono de nutación en torno al eje del impulso de giro. En geofísica, las oscilaciones de período corto del movimiento de precesión (debidas a fuerzas que varían en el tiempo) se llaman nutaciones del movimiento de precesión.

Onda de choque: Región que se forma delante de un cuerpo que avanza a velocidad supersónica. En ella cambian bruscamente los parámetros del entorno (densidad, presión, temperatura, campo magnético). También se forma una onda de choque cuando una comente supersónica entra en otro medio.

Órbita retrógrada: Todos los planetas se mueven alrededor del Sol en el mismo sentido. Sin embargo, observados desde la Tierra describen epiciclos, por lo que en ocasiones se mueven aparentemente en el sentido opuesto.

Parsec: Unidad de longitud habitual en astronomía Corresponde a la distancia desde la cual el radio de la órbita de la Tierra aparece con un ángulo de 1 seg de arco (1 parsec = 3,26 años luz).

Perihelio: El punto más próximo al Sol en la órbita elíptica de un cuerpo que gira alrededor de éste.

Período de rotación sideral: Duración de la rotación del eje de un cuerpo en relación con las estrellas fijas.

Período de rotación sinódico: Duración de la rotación del eje de un cuerpo en relación con el cuerpo central.

Período de semidesintegración: Tiempo que tarda en reducirse a la mitad una magnitud que disminuye de forma exponencial.

Polímeros: Sustancias compuestas de numerosas moléculas sencillas, ligadas entre sí por valencias principales obtenidas sintéticamente.

Precesión: El eje de una peonza en rotación describe un movimiento de precesión cuando sobre el cuerpo actúa una fuerza, ya que a través del momento de giro se incorpora al sistema un impulso de giro. Por regla general, un planeta (o una luna) se halla achatado: es por eso por lo que no está libre de fuerzas en el campo de gravedad del Sol (de los planetas) y tiene un movimiento de precesión. El eje de la Tierra describe en 25.700 años un cono con un ángulo de abertura de 23,5 grados con respecto a su propio eje (descubierto por Hiparco en el año 150 a.C.).

Presión de radiación: Un cuerpo que absorbe luz experimenta una fuerza, la presión de radiación (v. Apéndice 2).

Protón: Núcleo de hidrógeno con carga eléctrica uno.

Pulsar: Radiofuente cósmica que emite con gran regularidad impulsos de radiación. En la actualidad se conocen 150 pulsares. Es probable que los pulsares sean fragmentos de estrellas que han sufrido una explosión de tipo supernova. Se piensa que los pulsares son idénticos a las estrellas de neutrones.

Puntos de libración: Puntos libres de fuerza en el campo de gravitación de dos cuerpos (v. Apéndice 5), denominados también puntos de Lagrange, en honor de J. L. Lagrange, el matemático francés que en el siglo XVIII trató por primera vez el problema de los dos cuerpos.

Radiación cósmica: Núcleos atómicos ionizados cuya energía alcanza hasta 10^{21} electronvoltios (eV). A modo de comparación, en el gran acelerador del CERN, en Ginebra, se pueden alcanzar 10^{10} eV. La composición química de la radiación cósmica equivale a la del Sol o a la detectada en el material no diferenciado.

Radiación sincrotrón: Radiación electromagnética emitida por los electrones que se mueven en los campos magnéticos.

Radiación térmica de fondo: Cuando se formó el Universo en el "estallido primario", apareció también la radiación electromagnética, cuya densidad de energía disminuyó a lo largo del tiempo con la expansión del Cosmos Esta radiación, cuya temperatura equivalente sería de unos 3 grados Kelvin, ha sido medida por Penzias y Wilson, lo que se considera como la primera prueba experimental de la hipótesis del estallido primario.

Radical: Parte de la molécula compuesta por más de un átomo.

Regolita: Capa de rocas que se halla, por ejemplo, en la superficie lunar.

Resonancias: Cuando las órbitas de los planetas que giran alrededor del Sol o de las lunas que lo hacen alrededor de los planetas tienen entre sí una relación de números enteros (son conmensurables) se habla de resonancia El efecto a veces amplificador, a veces debilitador, de las fuerzas de gravitación determina perturbaciones en la revolución Los períodos de revolución de Júpiter y Saturno mantienen una proporción de 2:5 y la resonancia muestra un período de 883 años (en la longitud eclíptica conocida como "Gran Irregularidad". Algunas lunas de Júpiter y Saturno presentan una resonancia similar.

Sublimación: Paso directo de una sustancia del estado sólido al gaseoso, y viceversa

Supernova: Nova extremadamente intensa.

Tectónica: Desplazamientos de partes de la corteza de un planeta.

Termosfera: Capa de la atmósfera que se extiende desde la mesopausa hacia el exterior.

Tropopausa: Límite entre la estratosfera y la troposfera, situado a unos 10 km de altitud (18 km en el ecuador, 8 km en las proximidades de los polos): en él la temperatura alcanza un mínimo (–40 hasta –60 grados).

Troposfera: Capa de la atmósfera situada entre la superficie y la tropopausa.

Turbopausa: Límite superior de la zona de la atmósfera de un planeta, en el que pueden aparecer turbulencias. En la atmósfera terrestre se sitúa entre los 100 y los 110 km de altitud. Por encima de la turbo- pausa (en la termosfera) el rozamiento interno de los gases aumenta tanto que sólo resulta posible una corriente laminar.

Unidad astronómica (UA): Distancia media entre la Tierra y el Sol (149,5 millones de kilómetros).

Vector: Magnitud definida por un valor numérico y una dirección espacial.

Velocidad de escape: Velocidad mínima necesaria para escapar de un campo de gravedad.

Viento solar: Plasma que fluye del Sol.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Las ilustraciones indicadas a continuación han sido amablemente cedidas por:

Figura 3-1: Association of Universities for Research in Astronomy, Inc Sacramento Peak Observatoy, n.º 03100.

Figura 3-4: The Kitt Peak National Observatoy, n.º 02100.

Figura 3-5: N. R. Sheely Jr.. J. W Harvey, W. C. Feldman. Solar Physics 49, 271, figura 1, 1976.

Figura 3-6: Y. Uchida. M. D Altschuler. G. Newkirk Jr Solar Physics. 28, 495, figura 11, 1973.

Figuras 4-1, 4-2, 4-3, 4-6, 4-7, 6-1, 6-2, 6-4, 8-1, 8-2, 8-3, 8-4, 8-5, 8-6, 8-7, 8 8, 8-9, 8-10, 8-12, 12-7, amablemente cedidas por las autoridades de la NASA.

Figura 4-4: cedida por el Deutsches Bodenbetnebssystem GSOC de DFVLR de Oberpfaffenhofen. Imagen Meteosat.

Figura 5-1 Long Term Modulation of Cosmic Rav Intensity and Solar Activity Cycle, en 14. Intern. Cosmic Ray conference, 1975. Munich, vol. 3, página 995 de Y. C. Lin. C. Y. Fam. P E Damon. E. I. Wallick

Figura 5-2: EOS. Transactions. American Geophysical Union 61, n º 19, página 449, 1980.

Figura 5-3: «Die Bedeutung von Wasserstoff als zukunftiger umweltfreundlicher Se- kundárenergieträger in der Energie- und Antriebstechnik», de W. Peschka. DFVLR Nachrichten 30, página 25, figura 1, jumo 1980.

Figura 12-5: Manual de la NASA «Júpiter». NASA SP3031, página 81, 1967.

Figura 14-3: Dr. R Schwenn, Max Planck Instituí für Aeronomie. Katlenburg Lidau 3.

Figura 14-4: Dr. T. A Potemra. The Johns Hopkins University, Laurel. Md. EE.UU.

Tabla XV: Dr. H. U. Keller. Max Planck Institut für Aeronomie. Katlenburg-Lindau.



La exploración de los planetas se inició con el lanzamiento de sondas espaciales. Gracias a ellas se pudieron describir las órbitas, las rotaciones y las estructuras internas de los planetas. *Sol, lunas y planetas* es una clara, a la vez que rigurosa, exposición científica de los hechos que han ocurrido, ocurren y probablemente ocurrirán en el Sistema Solar. El libro describe también los meteoritos y los cometas, así como la composición y funcionamiento del espacio interplanetario. El autor ofrece en esta nueva edición los datos cuantitativos más recientes acompañados de numerosas ilustraciones y gráficos.

Erhard Keppler, nacido en Sindelfigen (Alemania) en 1930, es doctor en Ciencias Naturales. Estudió física en Tubinga y en Gotinga. Fue director científico del primer programa nacional de satélites AZUR. Ha dirigido varios programas de naves de investigación espacial y ha desarrollado instrumentos de medición que han sido instalados en numerosos satélites. En la actualidad es director técnico del Max Planck Institut für Aeronomie de Lindau bei Göttingen (Alemania).